Science de l'eau et politiques: Qualité des eaux souterraines

Un atelier parrainé par le CCME

21 mars et 22 mars, 2002

Toronto

Série d'ateliers du CCME : sciences de l'eau et politiques
Qualité des eaux souterraines

Un atelier parrainé par le Conseil canadien des ministres de l'environnement

---

Rédacteurs des comptes rendus de l'atelier :

Allan Crowe (Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux)
Karl Schaefer (Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux)
Al Kohut (Ministry of Water, Land and Air Protection, Colombie-Britannique)
Steve Shikaze (EarthFX Inc.)
Carol Ptacek (Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux)

Liste des conférenciers :

Jim Barker, University of Waterloo
David Blowes, University of Waterloo
John Cherry, University of Waterloo
Dick Coote, Agricultural Watershed Associates
Robert Gillham, University of Waterloo
Jim Hendry, University of Saskatchewan
Kim Hughes, ministère de l'Environnement et du Travail du Nouveau-Brunswick
Rob Kent, Environnement Canada
Don Lewis, Réseau canadien de l'eau
Kent Novakowski, Queen's University
Kevin Parks, Alberta Geological Survey
Russell Powers, coprésident de la FCM, Équipe nationale de la politique sur les options pour les eaux
Carol Ptacek, Institut national de recherche sur les eaux
Alfonso Rivera, Ressources naturelles Canada
David Rudolph, University of Waterloo
Frank Schwartz, Ohio State University
Leslie Smith, University of British Columbia
Garth Van der Kamp, Institut national de recherche sur les eaux
William Woessner, University of Montana

21 et 22 mars 2002

Toronto, Ontario

Le présent rapport n'est disponible qu'en version électronique; il peut être téléchargé à partir du site Web du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) : ou du site Web l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE) : http://www.nwri.ca/

Également disponible en anglais sous le titre : Groundwater Quality.

Les opinions exprimées par les conférenciers et les intervenants de l'atelier et dont le présent rapport fait la synthèse ne reflètent pas forcément celles du Conseil canadien des ministres de l'environnement. Elles ne sauraient par ailleurs être utilisées à des fins de publicité ou de promotion d'un quelconque produit. Le Conseil canadien des ministres de l'environnement n'endosse ni ne recommande aucun produit, procédé ou service commercial.

Le présent rapport peut être cité comme suit :

Crowe A.S., K.A. Schaefer, A. Kohut, S.G. Shikaze et C.J. Ptacek, 2003. Qualité des eaux souterraines. Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), Winnipeg (Manitoba). Série d'ateliers du CCME : sciences de l'eau et politiques. Rapport no 2. 56 p.

105-03769/

Contexte et tour d'horizon

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) est une tribune favorisant la collaboration des autorités fédérales, provinciales et territoriales canadiennes pour l'examen des questions environnementales prioritaires. Étant donné l'importance que les Canadiens attachent à l'eau et les préoccupations que suscitent chez eux les problèmes de qualité de l'eau, le CCME a fait de l'étude de cette question une de ses plus grandes priorités.

Le CCME s'attache entre autres à faire en sorte que tous ses membres, et notamment les décideurs, soient au fait des connaissances scientifiques ayant trait aux divers aspects de la qualité de l'eau. Il souhaite en outre fournir à ses membres les moyens d'informer la communauté scientifique des priorités qu'ils attachent à la recherche sur la qualité de l'eau.

Le CCME a dressé une liste préliminaire de trois domaines prioritaires d'échange d'informations :

1. incidences des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau;
2. qualité des eaux souterraines;
3. problèmes de qualité de l'eau liés à sa réutilisation et à son recyclage.

On a décidé que l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE) d'Environnement Canada organiserait, pour le compte du CCME, une série d'ateliers à l'occasion desquels des chercheurs de renom seraient invités à dresser un compte rendu des connaissances scientifiques sur les questions précitées. L'auditoire visé comprendrait des représentants des membres du CCME, d'autres ministères fédéraux, provinciaux et territoriaux ainsi que d'autres groupes d'intérêts. Les rencontres seraient organisées de manière à favoriser le dialogue, à mettre les responsables des politiques et des programmes au fait des récentes avancées scientifiques pour qu'ils puissent prendre de meilleures décisions, et à donner à ces derniers l'occasion d'influer sur l'orientation des recherches pour qu'elles répondent mieux à leurs besoins et priorités.

Vous avez entre les mains le rapport du deuxième atelier, tenu les 21 et 22 mars 2002 sous la présidence de l'INRE et du Ministry of Water, Land and Air Protection de la Colombie-Britannique. Une soixantaine de chercheurs et de décideurs des ministères provinciaux et fédéraux de l'environnement et de l'agriculture, d'autres ministères fédéraux, d'universités et d'organismes privés y ont participé. La série d'ateliers a remporté un énorme succès et a servi de point de départ à une vaste entreprise de promotion du dialogue entre les scientifiques et les décideurs.

Jennifer Moore
Coprésidente, Comité de coordination sur l'eau du CCME
Directrice générale
Direction générale des écosystèmes et des ressources environnementales
Environnement Canada
351, boulevard Saint-Joseph
Hull (Québec)
K1A 0H3

Ken Dominie
Coprésident, Comité de coordination sur l'eau du CCME
Sous-ministre adjoint
Ministère de l'Environnement
4e étage, édifice de la Confédération
Édifice de l'Ouest – promenade Prince Phillip
C.P. 8700
St. John's (Terre-Neuve)
A1B 4J6

Remerciements

Le comité organisateur souhaite remercier les nombreuses personnes et organisations pour l'ardeur et le dévouement dont elles ont fait preuve dans l'organisation de l'atelier :

- les coprésidents du Comité de coordination sur l'eau du CCME, Jennifer Moore et Ken Dominie, pour leur soutien et leurs encouragements;
- Nancy Gehlen et Anjanette Tomac, du Conseil canadien des ministres de l'environnement, pour leur soutien administratif;
- Pascale Groulx, John Temple et John Cooper, d'Environnement Canada, pour leur aide à la coordination avec les divers ministères fédéraux et provinciaux;
- Nora Doerr, de la University of Waterloo, qui s'est chargée de l'enregistrement des débats;
- Leah Brannan, Kristin Alward et Alex Bielak, qui ont contribué à la rédaction du présent rapport;
- Grazyna Modzynski, qui a préparé les graphiques de l'atelier et la mise en page du rapport;
- Freda Crisp et Esther Rae, qui se sont chargées du secrétariat;
- le Conseil canadien des ministres de l'environnement, l'Institut national de recherche sur les eaux, le Ministry of Water, Land and Air Protection de la Colombie-Britannique, le Réseau canadien de l'eau et CRESTech, qui ont fourni une aide financière;
- les conférenciers et les panélistes enthousiastes et avertis, pour leurs interventions claires, concises et réfléchies.

Nous nous sommes efforcés de saisir les points saillants de chacune des présentations, ainsi que des débats qui les ont suivis, et nous prenons à notre compte toutes les erreurs et les omissions dont les conférenciers et les intervenants ne sauraient être tenus responsables.

Allan Crowe
Coprésident, atelier du CCME
Environnement Canada, INRE
867, chemin Lakeshore, C.P. 5050
Burlington (Ontario) L7R 4A6
allan.crowe@ec.gc.ca

Al Kohut
Coprésident, atelier du CCME
Min. of Water, Land and Air Protection de la C.-B.
C.P. 9340, succ. « Prov. Govt »
Victoria (C.-B.) V8W 9M1
al.kohut@gems7.gov.bc.ca

Carol Ptacek
Coprésidente, atelier du CCME
Environnement Canada, INRE
867, chemin Lakeshore, C.P. 5050
Burlington (Ontario) L7R 4A6
carol.ptacek@ec.gc.ca

Karl Schaefer
Comité organisateur de l'atelier
Environnement Canada, INRE
867, chemin Lakeshore, C.P. 5050
Burlington (Ontario) L7R 4A6
karl.schaefer@ec.gc.ca

Résumé

Introduction

Dix millions de Canadiens dépendent des eaux souterraines comme source d'eau potable, et cette ressource est également vitale pour l'agriculture et les principales industries manufacturières, minières et pétrolières. Les eaux souterraines font partie intégrante du cycle hydrologique; elles influent de ce fait sur les cours d'eau, les lacs et les terres humides, ainsi que sur la qualité de leurs écosystèmes. Certains événements tragiques mettant en cause la qualité des eaux souterraines au Canada ont amené le public à prendre conscience de la vulnérabilité de cette précieuse ressource. Nos institutions doivent prendre acte de cette sensibilisation accrue des Canadiens et mettre en œuvre des programmes et des politiques plus efficaces de protection de la qualité des eaux souterraines en mobilisant les ressources scientifiques nécessaires à cette fin.

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) est la principale tribune canadienne de discussions et de collaboration intergouvernementales axées sur des questions environnementales d'intérêt national et international. En automne 2001, réagissant aux préoccupations suscitées par la qualité de l'eau au Canada, il a proposé une série d'ateliers — Sciences de l'eau et politiques — abordant les questions prioritaires liées à la qualité de l'eau. Organisés par l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada et dirigés par des coprésidents provinciaux, les ateliers de cette série communiquent aux principaux décideurs canadiens les résultats des recherches récentes et des nouvelles pratiques de gestion et fournissent aux scientifiques et aux gestionnaires des ressources hydriques les moyens de contribuer à l'élaboration des programmes canadiens sur l'eau.

Le deuxième atelier de cette série, *Qualité des eaux souterraines*, s'est tenu les 21 et 22 mars 2002. Il a rassemblé une soixantaine de chercheurs et de décideurs des ministères provinciaux et fédéraux de l'environnement et de l'agriculture, d'autres ministères fédéraux, d'universités et d'organisations privées. Les exposés d'éminents spécialistes des eaux souterraines, les discussions en groupes et les séances plénières ont porté sur l'état actuel des connaissances sur la qualité des eaux souterraines, en cherchant à lier sciences de l'eau et politiques. Toute une gamme de questions ont été abordées : vue d'ensemble sur l'écoulement de l'eau souterraine et sur les processus de transport des contaminants; nature des milieux de roches fracturées; rôle des aquitards; incidences de l'agriculture, de la production pétrolière, des activités municipales et des activités minières sur l'eau souterraine; agents pathogènes; sources de contamination naturelles; déversements de substances chimiques; aspects de l'évaluation des risques et gestion des bassins hydrographiques. Le présent rapport propose une synthèse des exposés scientifiques présentés et des discussions qui ont suivi sur les questions de politiques et de programmes. Le rapport fait également état de diverses initiatives ayant trait aux eaux souterraines ainsi que des observations formulées au cours de l'atelier sur les liens entre les sciences et les politiques et sur les moyens de maintenir le dialogue entre ces deux domaines d'activités.

Regards sur l'état des connaissances et sur les politiques

Milieux de roches fracturées – Les propriétés des aquifères et les conditions d'écoulement de l'eau souterraine sont beaucoup plus variables dans les milieux de roches fracturées que dans les milieu poreux. Cette variation peut avoir des répercussions importantes sur la migration des contaminants chimiques et biologiques. Les bactéries et les virus, en particulier, peuvent migrer rapidement et s'étendre sur une vaste superficie à partir de sources de contamination relativement petites. Du point de vue de l'application des politiques, il est essentiel de reconnaître que la gestion des ressources en eau ne peut être menée de la même façon dans les milieux de roches fracturées et dans les aquifères de sable et de gravier. La caractérisation de la migration des contaminants nécessite souvent beaucoup plus de ressources dans les premiers que dans les seconds. Les plans de protection des têtes de puits et les zones de gestion des eaux souterraines doivent tenir compte de la complexité des réseaux de fractures.

Contamination naturelle des eaux souterraines – Les substances nuisibles à la santé des humains présentes dans l'eau souterraine ne sont pas toutes d'origine anthropique. On trouve souvent dans les eaux souterraines des éléments et des substances comme l'arsenic, les fluorures et les sels à des concentrations supérieures aux recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (RQEPC). Divers processus naturels ainsi

que diverses pratiques d'utilisation de l'eau par les humains peuvent favoriser le rejet de ces substances dans l'eau souterraine et conduisent souvent à de fortes concentrations. Du point de vue de l'application des politiques, il importe au premier chef que les organismes municipaux, provinciaux et fédéraux responsables s'attachent activement à localiser les endroits où les concentrations de substances naturelles sont supérieures aux RQEPC. Cela signifie notamment qu'ils devraient recueillir des données de base sur la qualité des eaux souterraines avant d'en autoriser l'utilisation, veiller à l'application des règlements visant à limiter ou à surveiller le forage de puits dans les zones à risque élevé, mettre en œuvre des programmes réguliers plus rigoureux de contrôle des puits ruraux et diffuser des avis sanitaires.

Barrières d'argile – L'argile peut bloquer efficacement le passage des contaminants des eaux de surface aux eaux souterraines. Les programmes de protection des eaux souterraines invoquent de plus en plus souvent la présence, à la surface ou près de la surface du sol, de dépôts naturels d'argile pour prétendre que les aquifères ou les puits sont à l'abri des sources de contamination de surface. Par ailleurs, on utilise des doublures d'argile artificielles dans les zones d'évacuation ou d'entreposage des eaux usées afin de limiter la migration des contaminants vers les eaux souterraines. Or, du point de vue de l'application des politiques, rien ne permet d'assurer que les barrières d'argile procureront toujours une protection efficace. Les barrières naturelles ou artificielles peuvent se fissurer, et laisser ainsi libre passage aux contaminants. Il est donc essentiel d'examiner de très près les caractéristiques des couches d'argile afin de vérifier la présence possible de fractures et de mesurer les risques d'apparition de telles fractures avec le temps.

Agents pathogènes dans les eaux souterraines – Le transport et la persistance des agents pathogènes sous la surface du sol sont des phénomènes mal connus. La plupart des études ont mis l'accent sur les bactéries, et rares sont celles qui ont examiné le transport et le devenir des virus et des protozoaires. Nous avons besoin de techniques améliorées pour déterminer les sources et les types de contamination microbiologique dans l'eau des puits. Les réserves d'eau souterraine les plus exposées à la contamination par les agents pathogènes sont celles qui dépendent de puits peu profonds ou mal construits, de puits forés dans des aquifères directement reliés à une source d'eau de surface, ou de puits mal entretenus. Les agents pathogènes ne peuvent généralement pas franchir de grandes distances à travers des sédiments fins (argile, limon ou sable), mais ils peuvent être transportés sur de très grandes distances dans les roches fracturées et le gravier. Du point de vue de l'application des politiques, la protection des réserves d'eau devrait s'appuyer avant tout sur une approche à barrières multiples (ABM) conjuguant des pratiques améliorées de gestion des déchets, l'application de normes efficaces de construction des puits, la mise en vigueur autour des sources d'agents pathogènes d'une zone tampon minimale déterminée en fonction des caractéristiques du milieu géologique, et des méthodes de surveillance plus avancées.

Incidences de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines – Les tests de la qualité des eaux souterraines effectués dans les puits ruraux d'un bout à l'autre du Canada laissent communément constater la présence de nitrates, de bactéries ou de pesticides. On connaît encore mal les effets toxiques de la présence dans l'eau de pesticides multiples, ou l'incidence d'une exposition à long terme à des concentrations de nitrates ou de pesticides qui, sans dépasser les seuils prescrits par les RQEPC, restent quand même élevés. En raison de la nature régionale du problème de la contamination des eaux souterraines par les activités agricoles, les mesures de protection et les recherches doivent s'appliquer à l'échelle des régions ou des bassins hydrographiques. Les politiques devraient s'appuyer avant tout sur l'application de recommandations relatives à la qualité de l'eau et de protocoles d'essais visant des puits ruraux individuels. La réglementation actuelle ayant trait aux normes de qualité de l'eau et à la fréquence des tests s'applique uniquement aux systèmes de traitement municipaux. Il convient d'adopter des pratiques agricoles améliorées, fondées par exemple sur la mise en œuvre d'un plan agricole environnemental, dans les exploitations grandes ou petites. Pour assurer une surveillance adéquate du choix de l'emplacement, de la construction, de l'entretien et surtout de la mise hors service des puits, il faut pouvoir compter sur des règles plus claires et sur des inspections plus efficaces.

Enjeux ruraux et municipaux – La menace que font peser sur la qualité des eaux souterraines les sources urbaines de contamination s'aggravera à mesure que ces zones empiéteront sur des zones rurales traditionnellement desservies par des puits. L'épandage de fumier ou de pesticides à la surface du sol pose un problème particulier lorsqu'on le pratique à proximité d'un puits ou d'un champ de captage municipal mal conçu ou mal situé. Il est essentiel d'adopter des pratiques d'utilisation des terres et des politiques de zonage proactives prévoyant : la protection des têtes de puits; la protection des sources (bassins de réalimentation); la mise en place de meilleures pratiques de gestion et l'application de restrictions de zonage. Pour être efficaces,

toutes ces mesures devraient être adoptées à l'échelle de la région ou du bassin hydrographique. Les recherches devraient s'appliquer à l'amélioration des techniques et des modèles pour qu'ils prennent mieux en ligne de compte les liens qui existent entre l'eau souterraine, l'eau de surface et l'utilisation des terres à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques. De telles recherches contribueraient à définir d'une manière plus exacte la superficie des zones à protéger.

Déversements – Les déversements chimiques sont fréquemment constitués de substances organiques qui ne se dissolvent pas facilement dans l'eau (aussi connues sous le nom de liquides non aqueux, ou LNA). Les cas de contamination des eaux souterraines par ces substances ont beaucoup attiré l'attention, d'abord parce qu'ils posent un risque sérieux pour la santé des humains à de très faibles concentrations, et ensuite parce qu'ils pourraient devenir une source de contamination supérieure aux seuils prescrits par les RQEPC pour des décennies à venir. Il existe un peu partout au Canada de nombreux sites où de tels déversements ont contaminé l'eau souterraine, y compris des postes d'essence, des établissements de nettoyage à sec, des raffineries de pétrole, des usines chimiques, des installations de préservation du bois, des installation d'élimination des déchets et des sites industriels. L'examen de la réglementation relative à ces substances et celui des mesures de décontamination des sites touchés doivent progresser de front. La technologie permettant de récupérer ou de détruire les LNA progresse, mais sans qu'on sache clairement quels sont les objectifs à poursuivre. Les responsables de la réglementation et des politiques doivent à la fois être conscients des limites techniques des opérations de décontamination des sites et des coûts potentiellement énormes de la détection des contaminants, de la remise en état des sites et de leur surveillance. Il convient de décider à qui il appartient de payer les coûts de la décontamination, en particulier dans les sites abandonnés, et de contraindre ensuite les responsables à s'exécuter.

Problèmes propres à l'industrie minière – Il existe au Canada plus de 90 mines de métaux en exploitation et plus de 10 000 mines abandonnées. Les déchets de roche et les résidus miniers présents sur ces sites peuvent rejeter dans l'eau souterraine des acides, des sulfates et des métaux à des concentrations très supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC. Ces sources de contamination peuvent en outre persister pour des dizaines à des milliers d'années. Nous connaissons assez bien les processus qui conduisent aux rejets de métaux dans l'eau souterraine et à la génération d'eaux souterraines acides au sein des déchets miniers pour évaluer correctement l'incidence des activités minières sur la qualité des eaux souterraines. Toutefois, nous comprenons beaucoup moins bien les mécanismes de neutralisation de l'acide et de réduction de la teneur en métaux des eaux souterraines. D'une manière générale, nous savons peu de choses des problèmes actuels ou potentiels de qualité des eaux souterraines qui se posent dans les sites miniers abandonnés au Canada. Il conviendrait donc de revoir les recommandations pertinentes pour assurer la protection de la qualité des eaux souterraines au voisinage des mines. La construction de puits de contrôle permettant de détecter les problèmes de qualité des eaux souterraines devrait faire partie intégrante des stratégies de gestion des déchets des sites miniers actifs. Nous avons également besoin de lignes directrices pour les mines abandonnées, et notamment pour le choix des techniques appropriées de décontamination de l'eau souterraine.

Problèmes propres à l'industrie pétrolière – C'est le produit de plus d'un siècle d'exploration, de mise en valeur et de raffinage (trous de forage, bassins à boue, fosses de brûlage et sites de déversements abandonnés), d'application de normes environnementales moins strictes ainsi que du vieillissement des installations (dispositifs d'étanchéité, bouchons, cuvelage, pompes, pipelines et cuves de stockage utilisés pour les opérations de production et d'élimination) qui représente aujourd'hui la menace la plus sérieuse de l'industrie pétrolière pour la qualité des eaux souterraines. On en sait par exemple bien peu sur l'intégrité à long terme des bouchons en béton et des tubages en acier qui se trouvent dans les centaines de milliers de puits abandonnés d'un bout à l'autre du Canada. Il convient d'assurer en continu, avec le soutien des pouvoirs publics, un suivi des conditions de base et une surveillance de la qualité des eaux souterraines, tant dans les zones d'exploitation des ressources pétrolières classiques que sur les sites de mise en valeur de sources d'énergie non classiques, afin d'éviter que les activités d'exploration et de mise en valeur de ces ressources n'entraînent une dégradation de la qualité des eaux souterraines.

Évaluation des risques – Les modèles informatiques qui simulent l'écoulement des eaux souterraines et le transport des contaminants sont des outils précieux d'évaluation et de protection de la qualité des eaux souterraines. Malheureusement, les prévisions de ces modèles sont trop souvent très équivoques à cause de l'incertitude inhérente des paramètres d'entrée. Malgré leur grande complexité, ces modèles sont pour la plupart dépourvus d'une fonction d'analyse quantitative de l'incertitude des prévisions. Une telle analyse perme-

ttrait de quantifier la probabilité des erreurs dans les simulations par ordinateur ou dans les prévisions qui en découlent. Les spécialistes des eaux souterraines se servent déjà de cet outil, mais on ne l'utilise que rarement pour la prise de décisions réglementaires aux fins de l'évaluation des risques. Les organismes de réglementation devraient exiger que l'on incorpore l'analyse de l'incertitude dans les processus d'évaluation et de prévision afférents aux prises de décisions et à l'élaboration des politiques sur la qualité des eaux souterraines.

Qualité de l'eau des puits en milieu rural au Canada – Nombre d'études de la qualité de l'eau des puits portent régulièrement à conclure que les agents pathogènes représentent de loin les contaminants les plus communs de l'eau des puits au Canada. De 20 à 40 % de tous les puits ruraux présentent des concentrations de bactéries coliformes supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC. Les concentrations de nitrates dépassent quant à elles les seuils recommandés dans environ 15 % des puits ruraux. À titre de comparaison, les pesticides ne dépassent les concentrations acceptables que dans environ 0,1 % des puits ruraux. Il convient d'examiner plus attentivement l'utilité et l'efficacité des mesures actuelles de protection des sources pour prévenir la contamination de l'eau des puits par des agents pathogènes, les nitrates et d'autres contaminants. Les études laissent conclure que la contamination bactérienne de l'eau des puits pourrait menacer un nombre beaucoup plus grand de Canadiens que les contaminants industriels. Pourtant, on consacre plus de ressources et d'attention à la contamination d'origine industrielle. En conclusion, il convient de procéder à une étude nationale approfondie des résultats de l'ensemble des études effectuées au Canada sur la qualité de l'eau des puits, suivie d'études détaillées visant à réduire la menace que fait peser sur la santé des Canadiens la contamination de cette ressource.

Qualité des eaux souterraines : projets et perspectives

Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine – Un comité national spécial sur l'eau souterraine a élaboré un cadre de travail qui servira principalement à promouvoir l'acquisition de données de qualité et de connaissances de pointe sur l'eau souterraine, à améliorer les communications et la collaboration de tous les intervenants dans ce domaine, à mettre en place des liens efficaces entre les systèmes d'information sur l'eau souterraine, à constituer une base de ressources accessible à tous les paliers de l'administration publique et à tous les intervenants et à promouvoir une plus grande cohérence, à l'échelle nationale, des normes, recommandations, titres de compétence des foreurs et des professionnels, et de la formation. Il s'agit d'un document de travail qui permettra aux responsables de l'élaboration des politiques et de la réglementation de mieux tirer parti des ressources actuelles de la science et de la technologie.

Réseau pancanadien de documentation du CCME sur la qualité de l'eau – Il n'existe à l'heure actuelle aucun réseau national de surveillance de la qualité de l'eau au Canada. Les efforts de surveillance sont souvent fragmentaires, ignorant certains problèmes ou agresseurs importants, et les divers programmes existants ainsi que les données ou l'information qu'ils diffusent ne sont pas intégrés pour donner un aperçu régional ou national de la situation. Le plan d'action du CCME sur l'eau vise à unir les efforts en vue de la mise en place d'un *« réseau de réseaux et de programmes »* canadiens de surveillance de la qualité de l'eau, exploité en coopération par de multiples instances et partenaires et ayant pour objectif d'établir une base de données nationale sur la qualité de l'eau.

Réseau canadien de l'eau - Le Réseau canadien de l'eau (RCE) a pour mission d'assurer que le Canada maintienne un rôle de chef de file en matière de gestion et d'utilisation durables des ressources en eau, de protection de la santé des humains et des écosystèmes aquatiques, et de maintien de la croissance économique des secteurs de la technologie et des services dans le domaine de l'eau. Le RCE a pour rôle principal de promouvoir une vision intégrée, cohérente et nationale de la gestion de l'eau et de veiller à ce que les recherches nous fournissent les outils nécessaires à la conduite efficace et objective des débats sur les politiques nationales et l'élaboration de la réglementation. Le réseau a été mis sur pied en novembre 2001. Au nombre des thèmes qu'il est censé aborder, on peut mentionner la gestion des eaux usées, la salubrité de l'eau potable, les infrastructures, la mise en valeur, les eaux souterraines et la bonne gestion des affaires publiques.

Une approche municipale - La Fédération canadienne des municipalités (FCM) a créé un groupe d'étude sur la politique nationale et les options relatives à l'eau afin d'influer sur la réglementation fédérale, les budgets (y compris sur l'eau souterraine) et la qualité de l'eau potable. Le groupe s'est surtout intéressé à la gestion des bassins hydrographiques. La FCM préconise la délimitation des bassins hydrographiques ainsi que la détermination des utilisations des terres qui risquent d'influer sur la qualité des eaux souterraines afin

d'améliorer les stratégies de gestion du risque. Il conviendra de mobiliser tous les niveaux de gouvernement pour faire en sorte que l'infrastructure bénéficie de financements adéquats, que des normes nationales de la qualité de l'eau soient édictées et que la formation des opérateurs soit améliorée. La FCM préconise une amélioration de la planification de l'utilisation des terres afin de réduire les risques d'incidences négatives sur la qualité de l'eau.

L'approche américaine – Le U.S. Water Science and Technology Board (du NRC) a pour objectif de renforcer les moyens scientifiques et technologiques fondamentaux afin de résoudre les questions et les problèmes importants que posent la gestion et l'utilisation efficaces des ressources en eau. Le Board fait souvent appel à des groupes sélects (Blue Ribbon Panels) constitués de chercheurs de renom qu'il charge de se pencher sur des questions d'actualité. Il considère en particulier que des recherches scientifiques de qualité sont essentielles à l'élaboration de politiques rationnelles. Les groupes sélects sont utiles pour résoudre les problèmes. Par ailleurs, en ce qui a trait au financement, la « politique de la carotte et du bâton » joue un rôle utile d'orientation des recherches en faveur des secteurs prioritaires. L'ampleur et la complexité des problèmes liés à l'eau justifient de recourir à une approche multidisciplinaire, et le changement de paradigme en faveur des « technologies vertes » offre au Canada d'importantes possibilités de développement industriel.

Conjugaison des sciences et des politiques

Tout au long de l'atelier de deux jours, la question des moyens d'assurer une meilleure liaison entre les recherches portant sur la qualité des eaux souterraines et l'élaboration des politiques et la gestion des programmes la concernant s'est posée avec insistance et a donné lieu à un certain nombre d'observations :

Amélioration des communications entre les décideurs et les universitaires – L'amélioration des communications revêt une importance grandissante puisque les experts canadiens en matière de qualité des eaux souterraines se trouvent aujourd'hui en majorité dans les universités, qui sont par ailleurs responsables du gros des efforts de recherche en cette matière. Les chercheurs et les gestionnaires de politiques et de programmes devront, à terme, consacrer plus d'efforts pour faire en sorte que le processus décisionnel s'appuie davantage sur les connaissances scientifiques. La liste des participants à cet atelier a clairement démontré que la communauté scientifique est disposée à participer à l'élaboration des politiques et à la prise de décisions.

Les décideurs devraient se tenir au fait de l'évolution des connaissances scientifiques – Les participants ont soutenu que nous possédons aujourd'hui au Canada des connaissances scientifiques et des moyens technologiques suffisants pour améliorer sensiblement notre gestion des eaux souterraines. Des problèmes comme celui survenu à Walkerton peuvent être évités. Toutefois, il semble qu'en règle générale, les décideurs soient mal renseignés, pour diverses raisons, sur les résultats des quelque 20 dernières années de recherches consacrées à la qualité des eaux souterraines au Canada.

Centres de documentation scientifique – Pour favoriser une utilisation concrète des connaissances scientifiques, nous avons besoin de centres de documentation sur la qualité des eaux souterraines. Les informations de ces centres devraient être régulièrement mises à jour afin de rester utiles aux décideurs.

Groupes d'experts pour une prise de décisions rapide – D'une manière générale, les chercheurs et les décideurs travaillent selon deux échéanciers différents. Au Canada, il ne semble pas exister de mécanisme de promotion de la recherche sur la qualité des eaux souterraines dans les domaines prioritaires requis pour la prise de décisions. Aux États-Unis, on fait souvent appel à des groupes sélects pour favoriser le financement de la recherche dans les domaines prioritaires de l'élaboration des politiques. Il convient d'envisager beaucoup plus sérieusement le recours à une telle solution pour le Canada.

Les politiques et les programmes de recherche ont besoin d'être mieux articulés – Les experts de la qualité des eaux souterraines ignorent d'une manière générale la nature des recherches dont les décideurs ont besoin. Les projets publics de politiques et de programmes ayant trait à la qualité des eaux souterraines devraient être portés plus régulièrement à la connaissance des chercheurs. On pourrait promouvoir les recherches axées sur des enjeux politiques particuliers en consacrant à ces recherches des ressources financières spécifiques.

Mise en œuvre de l'approche à barrières multiples (ABM) – Les participants ont jugé que la mise en œuvre de l'ABM pourrait constituer une stratégie de gestion proactive importante pour protéger les eaux souterraines en milieu rural et, d'une manière générale, notre approvisionnement en eau potable.

Maintenir le dialogue

Le présent atelier constitue pour le CCME la première étape des efforts qui doivent conduire à l'instauration durable d'un dialogue fructueux entre la communauté des chercheurs et celle des décideurs dans le domaine de la qualité des eaux souterraines. Comme tous les autres ateliers de la série Sciences de l'eau et politiques, l'atelier consacré aux eaux souterraines a été conçu pour permettre l'examen en temps utile de questions d'importance cruciale pour le CCME, exposer une gamme diversifiée d'intervenants aux recherches de pointe dans le domaine et leur donner l'occasion d'en débattre, et mettre en place un processus permanent de communication et de transfert de l'information dans ce domaine.

Les participants se sont montrés extrêmement favorables à la poursuite de l'échange d'informations et du dialogue entre la communauté scientifique et les gestionnaires de politiques et de programmes dans le domaine de la qualité des eaux souterraines. Au moment même où il s'emploie à préparer le présent rapport, le CCME se penche déjà sur les moyens qui pourraient permettre de maintenir, et même de renforcer le dialogue instauré à l'occasion de l'atelier. Les participants ont insisté de leur côté pour que les futurs projets organisés dans ce sens prennent en ligne de compte les projets de politiques et les programmes élaborés d'un bout à l'autre du pays afin d'améliorer ou de maintenir la qualité des eaux souterraines.

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques

Pour la commodité du lecteur, le tableau suivant résume, pour chacun des thèmes scientifiques abordés au cours de l'atelier, les principaux besoins relevés en ce qui a trait à la recherche et les principales questions politiques soulevées.

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques

Besoins en matière de recherche	Perspectives politiques
Milieux de roches fracturées	
■ Développement durable et protection des têtes de puits dans les aquifères du substratum rocheux fracturées. ■ Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface; sorption des contaminants organiques; transport des produits chimiques agricoles et des bactéries; mélange et dispersion des contaminants dans des réseaux de fractures complexes. ■ Structure et continuité des fractures pour mieux prévoir le transport des contaminants sur de grandes distances dans les réseaux de fractures.	■ Reconnaître que l'écoulement de l'eau souterraine dans les milieux de roches fracturées sera très différent de celui observé dans les aquifères de sable et de gravier, et que la gestion des ressources en sera compliquée d'autant. ■ La caractérisation de la migration des contaminants dans ces milieux risque d'être complexe et coûteuse, comparativement à celle réalisée dans les milieux poreux. En conséquence, l'efficacité des mesures de décontamination risque d'être beaucoup plus aléatoire dans ces milieux. ■ Les plans de protection des têtes de puits et les zones de gestion des eaux souterraines doivent tenir compte de la complexité des réseaux de fractures et de leur faible capacité de stockage, ainsi que de la très grande vitesse d'écoulement de l'eau dans ces réseaux.
Contamination naturelle des eaux souterraines	
■ Évaluation nationale des contaminants naturels des eaux souterraines et de l'incidence des activités humaines sur les concentrations de ces substances. ■ Effets de l'exposition à long terme à des concentrations de contaminants naturels inférieures aux seuils prescrits par les RQEPC.	■ Dans les régions où on reconnaît l'existence de concentrations de contaminants naturels supérieures aux RQEPC, des avis sanitaires devraient être transmis à tous les propriétaires, en particulier avant le forage de puits. ■ Mettre en place des programmes de vérification de la qualité de l'eau souterraine dans les puits privés (ruraux) appliqués au fil du temps (pas seulement au moment du forage). ■ Envisager l'imposition de restrictions ayant trait au forage de puits, ou d'une réglementation sur la profondeur des puits dans les régions où il existe des problèmes sérieux, comme le font d'autres administrations. ■ Obtenir des données de base sur la qualité des eaux souterraines naturelles avant la mise en valeur de la ressource.
Barrières d'argile pour bloquer le passage des contaminants	
■ Déterminer l'étendue de la fissuration dans les dépôts d'argile de dimensions régionales. ■ Quantifier l'impact des réactions biologiques sur la migration des contaminants. ■ Décrire l'impact du transport des contaminants (p. ex., métaux) facilité par le carbone organique dissous. ■ Quantifier les interactions entre les contaminants dissous et la matrice riche en argiles, ainsi que les effets de ces interactions sur la migration de contaminants potentiels; caractériser la répartition des bactéries dans l'argile.	■ L'existence de dépôts d'argile naturels à la surface ne signifie pas toujours qu'il existe une barrière capable de bloquer le passage des contaminants. Ces dépôts sont très souvent fissurés, et ces fissures peuvent permettre aux contaminants d'atteindre les aquifères. ■ Avant de recourir à l'aménagement de barrières d'argile pour les installations d'élimination ou de stockage des déchets, ou d'entreprendre des projets d'utilisation des terres qui exigent une barrière de protection contre la contamination de l'eau souterraine, procéder à une étude complète de l'argile en profondeur pour vérifier l'existence possible de fissures.

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques (suite)

Besoins en matière de recherche	Perspectives politiques
Agents pathogènes dans les eaux souterraines	
■ Étudier le transport et la survie des agents pathogènes, notamment les virus et les protozoaires, et mettre au point à cette fin des modèles de simulation informatisés. ■ Mesurer l'apport de contaminants des vastes installations d'élevage du bétail et le transport de ces contaminants dans l'eau souterraine. ■ Accroître nos connaissances des types de bactéries présentes dans les puits et les aquifères.	■ Reconnaître que les bactéries représentent le principal groupe d'agents pathogènes présents dans les puits ruraux. ■ Environ 30 % des puits privés ruraux sont touchés par la contamination bactérienne, et les puits les plus exposés sont les puits peu profonds, forés dans des aquifères très perméables (gravier, roches fracturées). ■ Appuyer l'élaboration et la mise en vigueur d'une approche à barrières multiples (ABM) pour la protection des eaux souterraines rurales contre les agents pathogènes, notamment par : 1) l'adoption de règles sur la gestion des déchets; 2) le renforcement des lignes directrices sur la qualité de l'eau; 3) l'analyse de la sensibilité des aquifères; 4) l'adoption de règlements sur les fosses septiques et les distances de recul; 5) le contrôle de l'eau de source; 6) des épreuves de la qualité des eaux souterraines et des puits; 7) l'adoption de normes minimales de construction et d'entretien des puits. ■ Élaborer des recommandations ayant trait aux concentrations de virus, de protozoaires et de bactéries non coliformes.
Incidences de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines	
■ Vastes évaluations réalisées à l'échelle de la région ou du bassin hydrographique et qui rendent mieux compte des liens qui existent entre les caractéristiques du bassin hydrographique, l'hydrologie superficielle, les eaux souterraines, la météorologie, les propriétés des sols et les pratiques de gestion des exploitations agricoles. ■ Effets toxiques d'une exposition à long terme à des concentrations de nitrates ou de pesticides inférieures aux seuils prescrits par les RQEPC. ■ Exposition à long terme et résistance des membres des familles rurales aux bactéries pathogènes. ■ Capacité de survie des bactéries dans l'eau souterraine et l'eau des puits, et stratégies permettant d'éviter cette survie. ■ Incidence d'apports potentiellement importants de contaminants (en particulier de fumier) et mesure des distances que ces contaminants risquent de parcourir dans l'eau souterraine.	■ Concentrations de nitrates supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC : un problème touchant environ 15 % des puits ruraux. ■ Concentrations de pesticides supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC : un problème rare qu'on observe dans moins de 0,5 % des puits ruraux. ■ Les risques de contamination des eaux souterraines causée par l'agriculture augmenteront. ■ Tous les éleveurs et les agriculteurs (du petit producteur aux vastes entreprises d'élevage intensif du bétail) devraient être tenus d'avoir et de suivre un plan agricole environnemental. ■ Nous avons besoin de politiques et de règlements pour assurer l'application des recommandations pour la qualité de l'eau, améliorer les protocoles d'analyse de l'eau souterraine et assurer la mise en vigueur de normes minimales de qualité pour la construction et l'entretien des puits ruraux. ■ Élaboration de recommandations établissant des seuils de concentration minimale des nombreux pesticides qui peuvent aboutir dans l'eau potable.

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques (suite)

Besoins en matière de recherche	Perspectives politiques
Enjeux ruraux et municipaux	
■ Évaluation de l'ampleur des divers impacts qui s'exercent sur la qualité des eaux souterraines dans les milieux tant urbains que ruraux. ■ Définition plus exacte de la superficie des zones qui ont besoin d'être protégées. ■ Amélioration des techniques et des modèles permettant d'évaluer les rapports qui existent entre les eaux souterraines, les eaux de surface et l'utilisation des terres à l'échelle de la région ou du bassin hydrographique.	■ Les menaces que font peser les sources de contamination urbaines sur la qualité des eaux souterraines augmenteront avec l'étalement urbain. Il est essentiel d'adopter des règles proactives d'utilisation des terres et de zonage. Les pratiques acceptables d'utilisation des terres devraient intégrer : 1) l'aménagement de zones de protection des têtes de puits; 2) la protection des sources (bassins de réalimentation); 3) l'application de meilleures pratiques de gestion; 4) l'application de règlements de zonage. Pour être efficaces, toutes ces mesures devraient pouvoir s'appliquer à l'échelle des régions ou des bassins hydrographiques. ■ Le choix de l'emplacement des puits, leur forage et surtout leur mise hors service devraient faire l'objet de règles claires, rigoureusement appliquées. ■ Amélioration des informations sur l'ampleur du problème des puits incorrectement abandonnés et sur leur emplacement.
Industrie minière et métallurgie	
■ Comprendre les mécanismes de neutralisation des acides et de réduction des métaux présents dans les déchets miniers. ■ Élaborer une méthodologie pour convertir les tests en laboratoire en tests en conditions réelles. ■ Élaborer des modèles de prévision à long terme de la génération de contaminants par les déchets miniers et de leur rejet dans l'eau souterraine.	■ Les rejets dans l'eau souterraine, à partir des déchets miniers, de métaux, de sulfates et d'acides à des concentrations supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux seuils prescrits par les RQEPC risquent de persister pour des centaines à des milliers d'années. ■ Les aires d'évacuation des déchets doivent être conçues de manière à éviter la circulation de l'eau et de l'oxygène dans les déchets de roche et les résidus miniers. ■ Les effluents qui s'échappent des sites d'évacuation des déchets doivent être traités. ■ Adoption de recommandations pour protéger les eaux souterraines dans les sites d'évacuation des déchets, prévoyant notamment des mesures de contrôle et de décontamination. ■ Cautions raisonnables permettant de couvrir la fermeture du site et de possibles problèmes à long terme. ■ Il convient d'élaborer des base de données sur les sites en activité et abandonnés, la stabilité chimique, etc.
Déversements	
■ Techniques améliorées permettant de repérer précisément sur le terrain les liquides non aqueux (LNA) présents sous la surface du sol. ■ Mesures quantitatives du pouvoir de pénétration des LNAD (liquides non aqueux denses) jusqu'aux aquifères. ■ Amélioration de nos connaissances de la composition des LNA provenant de déversements ou de fuites.	■ L'examen de la réglementation relative aux LNAD et celui des mesures de décontamination des sites touchés doivent progresser de front; la technologie pour récupérer ou détruire les LNAD progresse, mais sans qu'on sache clairement quels sont les objectifs de remise en état à atteindre. ■ Les chercheurs et les responsables de la réglementation et des politiques répètent souvent les mêmes questions :

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques (suite)

Besoins en matière de recherche	Perspectives politiques
Déversements (suite)	
■ Élaboration de méthodes de localisation et de destruction des LNA présents dans les profondeurs du sol.	Combien de LNAD doit-on récupérer et détruire? Faut-il les éliminer à 100 %, ou un taux de 90 % suffira-t-il? Si nous sommes incapables de trouver la source, devrions-nous dépenser des sommes considérables pour chercher à remettre l'aquifère en état? Comment les responsables des politiques et de la réglementation feront-ils l'arbitrage entre les coûts, les engagements à long terme, et les risques possibles ou l'absence de risque pour la santé des humains? ■ Les responsables des politiques devraient participer à la validation et à la démonstration des technologies émergentes. Il s'agirait d'une approche intéressante pour sensibiliser les décideurs aux aspects scientifiques de ces questions et à l'état actuel de la technologie. ■ Les décideurs doivent être conscients à la fois des limites techniques de la décontamination des sites et des coûts énormes que pourraient entraîner la détection, la décontamination et le contrôle.
Problèmes propres à l'industrie pétrolière	
■ Évaluation de l'intégrité à long terme des pipelines, inspection des dispositifs d'étanchéité des trous de forage, des bouchons en béton et des tubages en acier des puits. ■ Évaluation de l'ampleur de la contamination des eaux souterraines en cas de détérioration d'un puits de pétrole dans un ancien champ de pétrole ou de gaz naturel. ■ Évaluation de l'efficacité des processus d'atténuation naturelle dans tous les milieux canadiens pour la remise en état des sites touchés par un déversement. ■ Définition d'études hydrogéologiques fondamentales sur le méthane des gisements de houille et les zones frontières d'exploration pour parvenir à reconnaître et à surveiller les contaminants de l'eau souterraine. ■ Vérification de l'incidence possible des projets thermiques — par exemple, l'injection de vapeur pour faciliter la récupération de l'huile lourde — sur la présence de contaminants naturels dans l'eau souterraine et sur l'intégrité des couches de confinement sus-jacentes (risque de fracturation). ■ Amélioration de la caractérisation des connexions hydrologiques entre les formations de stockage des eaux usées et les aquifères peu profonds ou les eaux de surface. ■ Vérification de la possibilité de rejeter les eaux saumâtres produites par l'exploitation du méthane des gisements de houille dans l'eau de surface (si la salinité est suffisamment faible, cette solution pourrait être envisageable) ou de les injecter sous la surface.	■ La menace que font peser sur la qualité des eaux souterraines tous les aspects des activités du passé (exploration, production, stockage, transport et raffinage et production pétrochimique) constitue un défi de taille pour les pouvoirs publics et l'industrie. ■ On connaît mal l'intégrité à long terme des bouchons de béton et des tubages d'acier qui se trouvent dans les centaines de milliers de puits abandonnés au Canada. Pourtant, les coûts des mesures visant à assurer la sécurité de ces installations ou la décontamination des aquifères sont considérables. ■ Nous avons besoin de programmes publics d'études continues de la situation de base et de surveillance continue de la qualité chimique des eaux souterraines pour pouvoir déterminer s'il existe un problème de contamination des eaux souterraines dans les champs pétrolifères classiques et évaluer les incidences environnementales cumulatives à long terme des méga-projets d'exploitation minière de sables bitumineux. ■ Le recours à l'atténuation naturelle ou aux technologies actuelles de remise en état des sites contaminés risque de ne pas être efficace dans tous les milieux canadiens.

Résumé des besoins en matière de recherche et des perspectives politiques (suite)

Besoins en matière de recherche	Perspectives politiques
Évaluation des risques	
■ Meilleure connaissance de la quantité de données requises pour caractériser correctement un système afin de réduire l'incertitude à un niveau acceptable. ■ Mise au point d'outils quantitatifs conviviaux d'analyse de l'incertitude afin d'en promouvoir et d'en simplifier l'utilisation par les responsables de la réglementation (il existe actuellement peu de systèmes automatisés (informatisés), sinon aucun). ■ Promotion des thèmes de recherche émergents faisant appel à l'élaboration de techniques plus puissantes de cartographie de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques, ainsi qu'à la quantification de l'incertitude des prévisions qui peut être attribuée à des erreurs dans la structure du modèle.	■ Les prévisions des modèles informatiques sont en règle générale très aléatoires à cause de l'incertitude inhérente des paramètres d'entrée, mais il est possible de prendre cette incertitude en compte à l'étape de la prise de décisions grâce à l'évaluation des risques. ■ Les responsables de la réglementation doivent encourager les auteurs de projets et leurs consultants à adopter plus fréquemment des méthodes d'évaluation des incertitudes en matière de prévisions dans l'utilisation des modèles d'eaux souterraines aux fins de la gestion et de la protection des systèmes d'eaux souterraines. Ils devront vraisemblablement pour cela accepter certains compromis quant au degré de complexité des modèles. ■ Lorsque c'est possible, la modélisation informatique devrait dépasser l'étape des calculs déterministes et opter pour un biais raisonnable, pour des études sur la sensibilité ou pour des évaluations de la pire éventualité.
Aperçu de la qualité de l'eau des puits ruraux au Canada	
■ Amélioration des techniques d'identification des sources de contamination microbiologique de l'eau des puits (eaux souterraines avoisinantes ou eau du puits lui-même). ■ Études pour établir si la contamination par les nitrates s'étend en superficie et en profondeur dans les aquifères. ■ Examen de l'utilité et de l'efficacité des mesures de protection des sources pour prévenir la contamination de l'eau des puits par les agents pathogènes, les nitrates et d'autres contaminants. ■ Étude à l'échelle nationale des cas documentés où la décharge d'eau souterraine contaminée a eu un effet important sur les eaux de surface et l'écologie aquatique.	■ L'omniprésence des cas de contamination de l'eau des puits par des agents pathogènes au Canada (environ 30 % des puits ruraux) constitue un problème de santé publique. ■ Nous avons besoin d'une étude nationale de la qualité de l'eau des puits. ■ Les puits peu profonds proches de la nappe phréatique dans les aquifères très perméables (sable, gravier, roches fracturées) sont beaucoup plus exposés que les puits profonds aux sources de contamination de surface. ■ Les puits mal construits ou mal entretenus sont très exposés à la contamination. ■ Nous avons besoin de normes nationales cohérentes pour la construction des puits, l'installation des pompes, la mise hors service des puits et l'octroi de permis de forage.

Table des matières

Contexte et tour d'horizon iii

Remerciements iv

Résumé v

Chapitre 1. Introduction 2

Chapitre 2. Regards sur l'état des connaissances et sur les politiques 3

2.1 Introduction par M. Robert W. Gillham, MSRC, O.C. 3

2.2 Milieux de roches fracturées 3

2.3 Contamination naturelle des eaux souterraines 7

2.4 Barrières d'argile pour bloquer le passage des contaminants 10

2.5 Agents pathogènes dans les eaux souterraines 13

2.6 Incidences de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines 16

2.7 Enjeux ruraux et municipaux 19

2.8 Industrie minière et métallurgie 24

2.9 Déversements : LNAL et LNAD 27

2.10 Problèmes propres à l'industrie pétrolière 30

2.11 Évaluation des risques 34

2.12 Aperçu de la qualité de l'eau des puits ruraux au Canada 37

Chapitre 3. Qualité des eaux souterraines : projets et perspectives 40

Chapitre 4. Qualité des eaux souterraines au Canada : état des lieux et leçons à tirer . . 43

Chapitre 5. Intégration des sciences de l'eau et des politiques 46

Chapitre 6. Maintenir le dialogue 48

Appendice 1. Programme de l'atelier 49

Appendice 2. Biographies des conférenciers 51

Appendice 3. Liste des participants 56

Chapitre 1.

Introduction

L'eau est un élément clé de l'économie canadienne moderne; ressource fondamentale pour la production alimentaire, elle joue en outre un rôle important dans presque tous les processus industriels modernes et dans nombre d'activités récréatives, et elle est essentielle au développement urbain. L'eau est essentielle à la santé et à la survie des plantes, des animaux et des humains. Au Canada, c'est une ressource généralement abondante et propre, mais il existe des endroits ou des régions où elle est polluée. Les eaux de surface et les eaux souterraines sont exposées aux polluants des décharges industrielles et municipales, au ruissellement et aux infiltrations des substances utilisées en agriculture et en foresterie, et aux dépôts de polluants aéroportés. La pollution peut notamment menacer les réserves d'eau potable dans certaines régions, entraîner la fermeture de la pêche coquillière sur les côtes de l'Atlantique et du Pacifique, la perte d'une partie des pêcheries des Grands Lacs, la réduction de la diversité des écosystèmes et une baisse de la gamme des possibilités récréatives.

Étant donné l'importance que les Canadiens attachent à l'eau et les préoccupations qu'ont récemment suscitées les problèmes de qualité de l'eau, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) a fait de l'étude de cette question une de ses priorités. Le CCME est la principale tribune canadienne de discussions et de collaboration intergouvernementales axées sur des questions environnementales d'intérêt national et international. Cette organisation qui rassemble les ministres de l'environnement des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada s'attache à promouvoir la coopération et la coordination intergouvernementales dans des domaines comme la gestion des déchets, la pollution atmosphérique, l'eau et les substances toxiques, et s'emploie en outre à élaborer et à maintenir à jour la base d'informations scientifiques nécessaires à la prise de décisions adéquates en matière d'environnement. Réagissant aux préoccupations suscitées par la qualité des eaux souterraines au Canada, le CCME a récemment parrainé une série d'ateliers portant sur les activités qui risquent d'influer sur la qualité des eaux souterraines, sur l'état des connaissances scientifiques portant sur cette question et sur la prise en compte de ces connaissances dans l'élaboration des politiques.

Dix millions de Canadiens dépendent des eaux souterraines comme source d'eau potable et cette ressource est également vitale pour l'agriculture et nos principales industries manufacturières, minières et pétrolières. Les eaux souterraines font partie intégrante du cycle hydrologique; elles influent de ce fait sur les cours d'eau, les lacs et les terres humides, ainsi que sur la qualité de leurs écosystèmes. Plusieurs événements mettant en cause la qualité des eaux souterraines au Canada — par exemple, la tragédie de Walkerton — ont amené le public à prendre conscience de la vulnérabilité de cette précieuse ressource. Nos institutions doivent prendre acte de cette sensibilisation accrue des Canadiens et mettre en œuvre des programmes et des politiques plus efficaces de protection de la qualité des eaux souterraines en mobilisant les ressources scientifiques nécessaires à cette fin.

Le présent rapport fournit un compte rendu de l'atelier *Sciences de l'eau et politiques : qualité des eaux souterraines* parrainé par le CCME, qui s'est tenu à Toronto les 21 et 22 mars 2002 (appendice 1). Cet atelier avait pour objectifs de présenter aux décideurs les résultats des recherches actuelles et de chercher des moyens de faire en sorte que ces recherches répondent mieux à leurs besoins, de déterminer les besoins futurs en cette matière, de contribuer à établir les priorités futures de la recherche et de mettre en place un processus permanent de communication et de transfert de l'information.

L'atelier a rassemblé une soixantaine de représentants d'administrations locales et de ministères provinciaux et fédéraux, d'universités et d'organismes privés. Les exposés d'éminents spécialistes des eaux souterraines, les discussions en groupes et les séances plénières ont porté sur l'état actuel des connaissances sur la qualité des eaux souterraines, en cherchant à lier sciences de l'eau et politiques. Toute une gamme de questions ont été abordées : vue d'ensemble sur l'écoulement de l'eau souterraine et sur les processus de transport des contaminants; nature des milieux de roches fracturées; rôle des aquitards dans la protection des aquifères; incidences de l'agriculture, de la production pétrolière, des activités municipales et des activités minières sur la qualité des eaux souterraines; agents pathogènes; sources de contamination naturelles; déversements de substances chimiques; aspects de l'évaluation des risques et gestion des bassins hydrographiques. Le présent rapport contient également des présentations succinctes sur divers projets importants ayant trait à la qualité des eaux souterraines et qui sont en cours de réalisation un peu partout au pays, ainsi qu'un compte rendu de l'approche des municipalités canadiennes et de celle des États-Unis.

Chapitre 2.

Regards sur l'état des connaissances et sur les politiques

Les grands sujets abordés lors de l'atelier sont exposés un à un ci-dessous. Chaque section est subdivisée en rubriques comme suit : contexte général; questions principales; état des connaissances (scientifiques); problèmes à élucider; perspectives politiques; ressources supplémentaires. Les exposés présentés par les conférenciers ainsi que les commentaires formulés et les questions posées pendant les périodes de débat forment l'essentiel de la matière présentée dans les pages qui suivent. Dans certaines sections, les rédacteurs ont ajouté des informations supplémentaires afin d'assurer une certaine uniformité dans l'étendue et la teneur des différents sujets abordés. Nous espérons que cette présentation fera du présent rapport un outil à la fois utile et complet pour les personnes à la recherche d'informations précises sur l'état actuel des connaissances scientifiques, les besoins en matière de recherche et les enjeux politiques y afférents.

2.1 Introduction par Dr. Robert W. Gillham, MSRC, O.C.

L'expression « loin des yeux loin du cœur » s'applique parfaitement à notre perception des eaux souterraines. En effet, même si près de dix millions de Canadiens dépendent des eaux souterraines comme source d'eau potable, les gens ouvrent leur robinet sans trop y penser, et ne commencent à s'inquiéter que lorsque surgissent des problèmes d'approvisionnement ou de qualité. On constate donc sans surprise que les gens ont en règle générale une perception très superficielle et souvent inexacte de l'état de cette ressource.

La gamme des conditions physiques et chimiques des eaux souterraines est beaucoup plus étendue que celle des eaux de surface. Leur vitesse d'écoulement peut varier de quelques centimètres par décennie à des centaines de mètres par jour; leur état chimique peut aller d'une pureté proche de celle de l'eau de pluie à une salinité supérieure à celle de l'eau de mer; enfin, leur âge peut varier de quelques heures à des dizaines de milliers d'années. Alors qu'on pensait, il y a à peine quelques décennies, que les eaux souterraines étaient largement à l'abri de l'influence des activités anthropiques, on sait aujourd'hui que ce n'est pas du tout le cas. Ainsi, l'évaluation d'une source donnée d'eaux souterraines à des fins de consommation domestique et la mise en œuvre de politiques qui protégeront la quantité et la qualité futures de cette ressource exigent la connaissance de divers processus interactifs.

La vitesse d'écoulement des eaux souterraines dépend étroitement de la perméabilité du milieu géologique à travers lequel elles s'écoulent ainsi que du gradient hydraulique. Ainsi, les sources d'eaux souterraines utilisées pour la consommation domestique sont généralement situées dans des milieux très perméables comme le sable, le gravier et les roches fracturées. La composition chimique naturelle des eaux souterraines dépend en grande partie de l'âge et de la dissolution des matériaux géologiques à travers lesquels elles s'écoulent. Les contaminants peuvent gagner les eaux souterraines par diverses voies, mais ils proviennent le plus souvent de sources situées à la surface du sol. L'advection, la dispersion, la filtration physique, la sorption, la précipitation et les transformations biologiques comptent parmi les principaux processus influant sur la migration des contaminants. Les processus qui dominent dans une situation donnée dépendent des conditions géologiques et géochimiques du milieu, ainsi que des caractéristiques chimiques et biologiques du contaminant. En conséquence, certains contaminants, bien que très toxiques, sont pratiquement immobiles et ne présentent donc aucun danger alors que d'autres, qui peuvent se déplacer à la vitesse de l'eau, sont très dangereux.

L'eau souterraine constitue une ressource considérable et dont la valeur économique est énorme. Sa qualité est en général excellente, mais, comme toutes les autres ressources naturelles, elle a besoin d'être bien gérée et protégée. Les scientifiques n'ont commencé que relativement récemment à s'intéresser à la migration des contaminants dans les eaux souterraines, mais ils ont accumulé au cours des trois dernières décennies un important bagage de connaissances. Pour assurer une gestion rentable de cette ressource, il est important de faire en sorte que ces connaissances soient prises en compte et appliquées dans l'élaboration de politiques de gestion appropriées.

2.2 Milieux de roches fracturées

Contexte général

On cherche en général les sources d'eau souterraine dans les dépôts de sable et de gravier, aussi connu sous le nom de « milieux poreux » à cause de la mul-

titude d'interstices — ou pores — qui séparent les grains de sable ou les cailloux de ces milieux et qui sont biens reliés les uns aux autres.

Beaucoup de Canadiens puisent cependant l'eau souterraine à partir d'un milieu différent : les roches sédimentaires (p. ex., calcaire, dolomie, grès) ou les roches cristallines (p. ex., granite) fracturées. Ces milieux peuvent devenir une source d'eau souterraine lorsque les morts-terrains qui les recouvrent ne sont pas trop épais, ou que leur capacité de stockage de l'eau souterraine est limitée. On peut puiser l'eau souterraine à partir d'une seule fracture ou d'un réseau de fractures dont la densité est suffisante. Les aquifères de roches fracturées contiennent des fractures horizontales et des fractures verticales. Les fractures même extrêmement minces (moins d'un millimètre) sont capables d'acheminer des volumes sensibles d'eau. D'une manière générale, les roches qui entourent une fracture produisent peu d'eau.

Les aquifères de roches fracturées sont communs dans toutes les régions du Canada. On peut mentionner à titre d'exemple le bassin carbonifère des Maritimes, l'aquifère de carbonate des basses terres du Saint-Laurent, dans le sud-ouest du Québec, l'aquifère de carbonate de Cambridge, en Ontario, les roches cristallines de l'Ontario, l'aquifère de carbonate de la vallée de la Rouge et de la région des lacs, au Manitoba et les roches sédimentaires du Crétacé, en Alberta. Dans ces régions, on obtient l'eau souterraine rurale grâce à des puits forés dans le calcaire, la dolomie, le grès ou le schiste. Malheureusement, l'eau des aquifères de roches fracturées est souvent de piètre qualité à cause de ses teneurs élevées en sulfates, en méthane ou en sels.

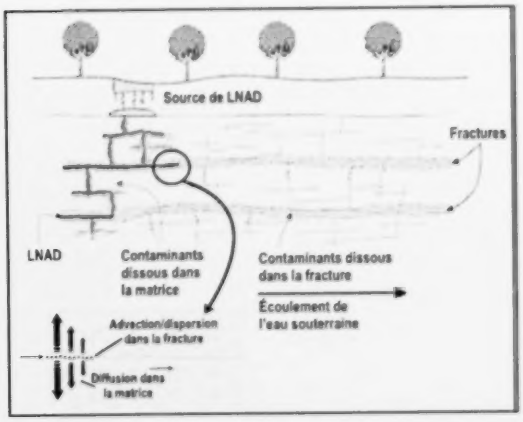

Fig. 1 Transport complexe d'un LNAD dans un aquifère de substratum rocheux fracturé; écoulement d'advection dans la fracture et diffusion dans la matrice rocheuse.

Questions principales

Les différences de structure observées entre les aquifères de milieux poreux et les aquifères de roches fracturées influent sur nombre des caractéristiques de ces aquifères, notamment :

1. l'écoulement et la disponibilité de l'eau souterraine;
2. le transport et le degré de contamination;
3. la caractérisation mathématique et physique;
4. notre connaissance de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants.

Ceci signifie que les aquifères des milieux de roches fracturées ne sauraient être traités de la même manière que ceux des milieu poreux, et que les principes fondamentaux et communs sur lesquels se fonde notre connaissance de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants dans les milieu poreux ne sont en règle générale pas applicables aux milieux de roches fracturées.

Différences relatives à l'écoulement et au stockage de l'eau souterraine

Dans la plupart des aquifères du substratum rocheux, les eaux souterraines migrent par des discontinuités dans la roche (c'est-à-dire, par des fractures et par des joints). La masse rocheuse adjacente présente souvent une très faible conductivité hydraulique et une porosité faible à modérée. Dans les roches cristallines, la porosité primaire peut être de seulement 0,05 %, alors qu'elle peut atteindre 30 % ou plus dans un aquifère de sable ordinaire. Ainsi, le volume d'eau stocké dans un aquifère du substratum rocheux est souvent inférieur de plusieurs ordres de grandeur à celui stocké dans un milieu plus poreux. En conséquence, un pompage continuel à des fins d'approvisionnement municipal ou même domestique dans un milieu de roches fracturées risque de drainer les eaux souterraines sur de plus grandes superficies. Dans certaines régions, le pompage intense dans des aquifères de carbonate a entraîné des effets observables à plusieurs kilomètres de distance. On peut tirer deux conclusions de cette observation : premièrement, les réserves d'eau des aquifères du substratum rocheux se prêtent mal à une exploitation continue et sont plus exposées à l'interférence entre les puits et à la surconsommation que celles des aquifères poreux de superficie équivalente; deuxièmement, la zone de recharge à protéger de la contamination risque d'être sensiblement plus grande dans les premiers que dans les seconds.

Comme les eaux souterraines mobiles empruntent en majeure partie des plans de fractures définis qui ne

Tableau 1: Caractéristiques comparées des aquifères de milieu poreux et des aquifères de roches fracturées.

	Milieu poreux	Roches fracturées
Équation d'écoulement de l'eau souterraine	Loi de Darcy	Loi cubique
Tests de l'aquifère	Essai de pompage	Essai d'injection d'eau
Capacité de stockage	Grande	Petite
Vitesse d'écoulement de l'eau	Moins grande	Plus grande
Interférence des puits	Faible risque	Risque plus élevé
Migration prévisible des contaminants	Possible	Très difficile
Conductivité hydraulique de l'aquifère	Étendue plus faible	Étendue plus grande
Porosité de l'aquifère	Étendue plus faible (25-50 %)	Étendue plus grande (0,05-40 %)

représentent qu'un très faible pourcentage du volume total de la roche, la vitesse de circulation peut être très rapide. Par exemple, on observe des vitesses typiques de migration des eaux souterraines de l'ordre de 0,01 à 0,5 m/jour dans un aquifère de sable, comparativement à des vitesses de 1 à 100 m/jour dans les dolomies fracturées du sud de l'Ontario. Ainsi, le transport des contaminants peut être relativement rapide dans les aquifères de roches fracturées.

La vitesse de transmission, la conductivité hydraulique et la porosité risquent d'être beaucoup plus variables dans un aquifère de roches fracturées que dans un aquifère poreux à cause de la répartition irrégulière des fractures et de leur taille. Ainsi, pour déterminer les propriétés hydrogéologiques d'un aquifère de roches fracturées et la vitesse de circulation de l'eau souterraine qu'il contient, il faut d'abord déterminer les propriétés distinctes de chacune de ses fractures.

Étant donné la complexité des aquifères de roches fracturées, il est très difficile de définir l'écoulement de l'eau souterraine et les propriétés hydrogéologiques d'une fracture donnée, et à plus forte raison de l'aquifère entier. Les connaissances et les techniques que nous utilisons sur le terrain pour définir l'écoulement de l'eau souterraine et les propriétés hydrogéologiques de ces aquifères dont différentes de celles employées pour les aquifères de milieux poreux, et les concepts mathématiques et physiques applicables à ces derniers (p. ex., loi de Darcy) s'appliquent mal à la plupart des aquifères de roches fracturées.

Différences relatives au transport et à la rémanence des contaminants

Les milieu poreux sont par leur nature même propices à une large dispersion des contaminants et nous sommes en mesure de prédire assez exactement l'importance de la contamination des eaux souterraines en fonction de la distance qui les sépare de la source de contamination, ainsi que le mode de dispersion des contaminants dans ces milieux. Dans les milieux de roches fracturées, le transport des contaminants est limité à une seule fracture ou à un petit nombre de fractures. Ainsi, même si la diffusion latérale du contaminant risque d'être limitée, comparativement à ce qu'on pourrait observer dans un milieux poreux, la distance franchie risque d'être beaucoup plus grande. Les réseaux de fractures par lesquels circulent les eaux souterraines dans la plupart des aquifères du substratum rocheux sont souvent complexes, très hétérogènes et, dans la plupart des cas, imprévisibles. Les fractures horizontales peuvent assurer une dispersion rapide du contaminant, et les fractures verticales permettent à ce dernier de pénétrer rapidement et profondément dans le sol. Dans de telles circonstances, la contamination des eaux souterraines risque de prendre des proportions beaucoup plus grandes qu'elle ne le pourrait dans un milieu poreux. Dans la plupart des aquifères de roches fracturées, il existe d'ordinaire un réseau bien établi de fractures par lequel circulera la plus grande partie de l'eau souterraine contaminée à partir de la source de contamination.

L'écoulement de l'eau souterraine dans les fractures influe sensiblement sur la vitesse de migration des contaminants chimiques et biologiques. Les bactéries et les virus, en particulier, peuvent migrer à la même vitesse que les eaux souterraines, ce qui peut conduire à une diffusion large et rapide à partir d'une source relativement petite (p. ex., de la surface à des puits du voisinage). Heureusement, dans le cas des contaminants chimiques, la diffusion du contaminant dans la matrice rocheuse adjacente a au départ pour effet de ralentir la vitesse de migration. Toutefois, à partir du moment où l'eau contaminée commence à circuler dans la fracture, la roche conta-

minée adjacente peut devenir une source de contamination à long terme en rejetant peu à peu dans l'eau qui circule les contaminants qu'elle contient.

Lorsque des contaminants hydrofuges comme l'essence, les solvants chlorés ou les LNAD (liquides non aqueux denses) comme les PCB sont introduits dans ces milieux, leur diffusion est habituellement extrêmement complexe, difficile à caractériser et encore plus difficile à éliminer. On relève au Canada des cas de plus en plus nombreux de contamination par l'essence ou par le carburant diesel des aquifères du substratum rocheux et de contamination de roches fracturées par des déversements de solvants.

Beaucoup des aquifères de roches fracturées (sédimentaires ou cristallines) sont recouverts d'une couche de morts-terrains mince qui les protège mal contre les contaminants présents dans l'eau de surface ou de ruissellement. Ces aquifères sont donc très vulnérables aux sources de contamination anthropique de surface. Les zones de captage nécessaires à l'alimentation des aquifères de roches fracturées doivent être beaucoup plus grandes que celles requises pour les milieux poreux à cause de leur capacité de stockage limitée. Cependant, comme le transport des contaminants n'est d'ordinaire assuré dans ces aquifères que par un seul réseau majeur de fractures, la zone de captage de la contamination est beaucoup plus petite. La délimitation des zones de protection des têtes de puits doit donc se fonder sur la zone de captage du contaminant, plutôt que sur la zone de captage de l'aquifère entier. Une évaluation judicieuse des zones de captage peut ainsi permettre de limiter la superficie des zones de protection des têtes de puits pour les aquifères de roches fracturées.

État des connaissances

Les chercheurs savent très bien que les aquifères de roches fracturées sont très différents des aquifères de milieux poreux et qu'ils doivent donc être traités différemment. Malheureusement, les experts-conseils en eaux souterraines et les responsables de la réglementation ne tiennent généralement pas compte de ces connaissances et ne font donc pas de distinction entre milieux de roches fracturées et milieu poreux. Ce problème découle peut-être en partie du fait que les intervenants connaissent mal les phénomènes de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants dans les roches fracturées, mais la communauté scientifique n'en sait guère plus sur la question. L'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants au sein d'une fracture unique sont par contre assez bien connus, tout comme les effets de la diffusion des contaminants dans la masse rocheuse adjacente (matrice) et à partir de cette masse. Nous sommes donc en mesure de contrôler et de prédire le transport des contaminants sur de courtes distances (de l'ordre de quelques mètres).

Problèmes à élucider

Il existe à l'heure actuelle peu d'équipes de chercheurs du secteur public et des universités poursuivant des recherches sur l'hydrogéologie des roches fracturées. Les recherches en cours sont surtout consacrées à la migration des contaminants et à la mise au point de techniques de décontamination, et on n'accorde que peu d'attention au développement durable et à la protection des têtes de puits dans les aquifères du substratum rocheux. De plus, on connaît encore assez mal un grand nombre de processus fondamentaux comme les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, la sorption des contaminants organiques, le transport des produits chimiques agricoles et des bactéries, ainsi que le mélange et la dispersion des contaminants dans des réseaux de fractures complexes.

Nos connaissances de la structure et de la continuité des fractures sont limitées. En conséquence, nous sommes incapables de prédire avec précision le transport des contaminants à l'intérieur d'une fracture unique, sur de courtes distances. Nous sommes également incapables de prédire l'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants à l'intérieur des réseaux de fractures. Étant donné notre ignorance en ces matières, nous sommes incapables, dans l'état actuel des choses, de récupérer les contaminants présents dans les milieux de roches fracturées ou de décontaminer ces milieux.

Perspectives politiques

Du point de vue de l'application des politiques, il est essentiel de reconnaître que la gestion des ressources en eau des roches fracturées ne peut être menée de la même façon que celles des aquifères de sable et de gravier. À cause de la complexité du problème, la caractérisation de la migration des contaminants nécessite beaucoup plus de ressources pour les milieux de roches fracturées que pour les milieux poreux. Les gestionnaires de sites doivent tenir compte de ces contraintes qui rendent les mesures de décontamination des milieux de roches fracturées beaucoup moins efficaces que celles des milieux poreux. Les plans de protection des têtes de puits et les zones de gestion des eaux souterraines doivent tenir compte de la complexité des réseaux de fractures et de facteurs comme la recharge, la décharge et les utilisa-

tions non durables dans les réseaux d'écoulement d'eaux souterraines à faible capacité de stockage et à vitesse d'écoulement très élevée.

Références

Lapcevic, P.A., K.S. Novakowski et E.A. Sudicky. 1998. Groundwater flow and solute transport in fractured media. dans: J. Delleur (éd.), *Groundwater Engineering*, CRC Press, p. 17-1–17-39.

Novakowski, K.S. 2000. Fate and transport in fractured rock. dans: J. Lehr (éd.), *Standard Handbook of Environmental Science, Health, and Technology*, McGraw-Hill Inc., p. 4.74–4.86.

2.3 Contamination naturelle des eaux souterraines

Contexte général

Beaucoup d'activités humaines influent sur la qualité des eaux souterraines. Toutefois, l'absence de tout effet anthropique sur le régime des eaux souterraines ne signifie pas nécessairement que la qualité de ces eaux répondra aux normes prescrites pour la consommation par les humains et le bétail, l'irrigation ou les utilisations industrielles. Il existe dans les eaux souterraines de nombreuses substances naturelles dont la concentration risque souvent de dépasser les seuils recommandés. Certaines de ces substances peuvent présenter un risque pour la santé des humains lorsqu'elles atteignent des concentrations élevées, notamment :

- des métaux comme l'arsenic, le mercure, le sélénium et le plomb;
- des substances non métalliques comme les fluorures, les nitrates et les sulfates;
- des éléments radioactifs comme l'uranium et le thorium;
- des gaz comme le radon.

D'autres substances naturelles dont les concentrations sont souvent supérieures aux recommandations pour la qualité de l'eau présentent uniquement un problème esthétique et sont sans danger pour la santé humaine aux concentrations habituellement mesurées dans l'eau souterraine. Cependant, même si les problèmes liés au goût, à la couleur ou à l'odeur ne présentent pas un risque pour la santé, les gens auront tendance à croire qu'une eau qui n'a pas l'air bonne ou qui ne sent pas bon sera également insalubre. Voici quelques exemples de ce problème :

- fer et manganèse : taches sur les appareils sanitaires;
- matières dissoutes (notamment le chlorure) : problèmes de goût;
- calcium et magnésium : dureté de l'eau;
- hydrogène sulfuré : problèmes d'odeur.

On trouve partout au Canada des endroits où il existe des concentrations élevées de substances naturelles particulières. La présence d'un élément ou d'une substance donnée et sa concentration dans l'eau souterraine sont liées directement au milieu géologique dans lequel s'écoule l'eau souterraine, ainsi qu'aux conditions physiques, hydrologiques et météorologiques qui caractérisent chacune des différentes régions du Canada.

Questions principales

Les substances nuisibles à la santé des humains que l'on trouve dans l'eau souterraine ne sont pas toutes d'origine anthropique. Certaines substances et certains éléments naturels atteignent souvent dans l'eau souterraine des concentrations supérieures aux RQEPC. Ces éléments et ces substances existent à l'état naturel dans les sédiments et les roches qui forment des aquifères. Divers processus naturels et diverses pratiques d'utilisation de l'eau par les humains peuvent favoriser le rejet de ces substances dans l'eau souterraine et conduisent souvent à de fortes concentrations.

Présence des substances naturelles

L'eau de pluie qui passe à travers le sol devient légèrement acide en absorbant par dissolution le dioxyde de carbone produit par les plantes et les organismes du sol. Cette acidité suffit à dissoudre également les minéraux et les sédiments du sol, qui sont ainsi également entraîné dans l'eau. L'oxygène présent dans la zone pédologique peut lui aussi favoriser des réactions oxydatives. L'oxydation de matières solides comme l'arsénopyrite peut conduire à une hausse des teneurs en arsenic dissous de l'eau d'infiltration. Cette eau et les substances dissoutes qu'elle contient finit par atteindre la nappe phréatique et se mêle à l'eau souterraine. Par ailleurs, l'eau souterraine qui s'écoule à travers les roches et les sédiments qui forment les aquifères se charge de substances et d'éléments divers sous l'effet de phénomènes comme la dissolution, l'échange cationique et la désorption.

Dans les milieux qui contiennent suffisamment de matière organique, la décomposition de cette matière par les bactéries consomme l'oxygène présent dans l'eau souterraine. Cette désoxygénation de l'eau souterraine conduit à la dissolution des oxydes de métaux solides (p. ex., réduction de l'oxyde de fer et de l'hydroxyde de fer en fer dissous). Les bactéries qui consomment de l'oxygène peuvent également provoquer une réduction des sulfates, et produire ainsi du sulfure d'hydrogène qui, au contact du

dioxyde de carbone dissous, engendre la production de méthane. Certains oligo-éléments liés à des solides comme les oxydes et les hydroxydes de fer peuvent également être libérés. Des éléments comme l'arsenic peuvent être libérés sous l'effet de phénomènes d'oxydation et de réduction.

La nature du milieu géologique dans lequel se produit l'infiltration et l'écoulement de l'eau souterraine détermine la composition chimique de l'eau souterraine ainsi que les concentrations des substances dissoutes. Par exemple, l'eau souterraine qui coule dans des formations de roches granitiques (p. ex., le Bouclier canadien) ou de schistes est généralement acide et peut donc dissoudre et mobiliser les métaux. Les roches carbonatées (p. ex., calcaire et dolomie) ont au contraire pour effet de neutraliser l'acidité de l'eau souterraine et de réduire ainsi la dissolution et la mobilité des métaux. Cependant, certaines substances comme l'arsenic restent mobiles sous une large gamme de conditions de pH.

Incidence des activités humaines sur la qualité des eaux souterraines naturelles

Les activités humaines peuvent également conduire à une hausse des concentrations de substances naturelles qui, en conditions normales, ne dépasseraient pas les seuils prescrits par les RQEPC. Il s'agit d'un effet indirect lié à l'utilisation des eaux souterraines qui conduit à des changements géochimiques influant sur la qualité des eaux souterraines naturelles.

Les sols des zones arides du Canada comme le sud des Prairies et l'intérieur de la Colombie-Britannique contiennent naturellement des sels comme le chlorure de sodium, le gypse et l'anhydrite. L'irrigation peut accroître la salinité de l'eau souterraine puisque l'eau d'irrigation qui s'infiltre dans le sol y dissout les sels et les transporte jusqu'à la nappe phréatique beaucoup plus rapidement qu'en conditions naturelles.

Dans les régions côtières, il existe aux endroits où l'eau douce souterraine se jette dans la mer un état naturel d'équilibre dynamique qui empêche la pénétration d'eau de mer dans les aquifères. Le pompage prolongé de l'eau souterraine dans ces régions peut réduire l'apport d'eau douce et perturber cet équilibre, conduisant ainsi à une incursion irréversible de l'eau de mer à l'intérieur des terres et à une contamination des puits. Les zones côtières de l'Île du Prince-Édouard et des Gulf Islands, en Colombie-Britannique, sont particulièrement exposées à ce phénomène.

Dans le sud des Prairies, la culture des sols vierges a conduit à une hausse des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines due à l'oxydation de l'azote des plantes et à la lixiviation de ces nitrates jusque dans la nappe phréatique.

Dans beaucoup de cas, le simple pompage de l'eau souterraine à partir d'un puits peut modifier l'état chimique du matériau constituant l'aquifère et de l'eau souterraine proche du puits. Par exemple, ce pompage peu provoquer l'infiltration d'eau riche en oxygène dans un substratum rocheux ou un till contenant des minéraux, ce qui pourra entraîner l'oxydation de divers éléments. Dans les Prairies, le pompage de l'eau des puits privés provoque généralement l'oxydation des pyrites des tills et des filons de charbon, conduisant ainsi à une hausse des concentrations de sulfates dans les puits. Au Nouveau-Brunswick, le pompage de l'eau dans des puits municipaux a provoqué des infiltrations d'eau de rivière dans l'aquifère principal d'une ville, entraînant une hausse des concentrations de manganèse. Dans beaucoup de régions du Canada, l'arsenic naturel présent dans le substratum rocheux et dans les morts-terrains est libéré dans l'eau souterraine où il peut atteindre des concentrations supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC. Le pompage de l'eau des puits et l'abaissement du niveau de la nappe phréatique risquent de favoriser de tels rejets d'arsenic.

État des connaissances

Nous savons qu'il existe partout au Canada, dans l'eau des puits privés, des substances et des composés naturels dont les concentrations dépassent les seuils prescrits par les RQEPC. Ce phénomène est directement lié à la composition géochimique du sol, des sédiments et des roches à travers lesquels s'écoulent les eaux souterraines.

La présence d'arsenic à des concentrations supérieures aux RQEPC dans l'eau des puits privés est un problème commun et bien documenté d'un bout à l'autre du Canada. Les concentrations d'arsenic mesurées dans certaines réserves d'eau souterraine au Canada atteignent des niveaux qui, observés dans des pays sous-développés, ont suscité l'inquiétude de la communauté internationale. Les concentrations élevées observées dans l'eau souterraine sont liées à celles présentes dans les matières solides des aquifères, y compris les tills (en Alberta et en Saskatchewan), les schistes (au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et en Saskatchewan) et les roches ignées et métamorphiques (en Ontario, en Saskatchewan, en Colombie-Britannique, à Terre-Neuve et ailleurs). On a par ailleurs signalé des concentrations élevées d'uranium dans des puits du sud-ouest de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick, du nord de Kingston (Ontario) et de la Saskatchewan. La présence

de radon a été signalée dans certaines régions de l'Ontario, de la Saskatchewan et de l'Alberta. On a mesuré des valeurs de la salinité supérieures aux RQEPC dans des puits privés situés le long de l'escarpement de Niagara, en Ontario, et un peu partout en Alberta et en Saskatchewan. On signale régulièrement dans toutes les provinces la présence de concentrations élevées de sulfates dues à l'oxydation des pyrites et à la dissolution du gypse.

Problèmes à élucider

Beaucoup d'études ont été entreprises au Canada afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines dans les puits privés. Ces études visent en général à répondre à des problèmes particuliers. Le Canada dispose d'une base de données complète sur les analyses de la qualité des eaux souterraines réalisées dans tout le pays, mais aucune évaluation nationale des contaminants naturels des eaux souterraines ni aucune étude complète de l'incidence des activités humaines sur les concentrations de ces substances n'a encore été réalisée. Un certain nombre d'études récentes réalisées sur l'arsenic dans l'eau souterraine laissent conclure qu'une proportion élevée des puits produisent une eau dont la teneur en arsenic dépasse largement les seuils recommandés. Ces études donnent à penser que la présence de concentrations inacceptables d'arsenic dans l'eau souterraine pourrait être beaucoup plus répandue qu'on ne l'avait anticipé jusqu'ici. Les seuils recommandés pour la concentration d'arsenic dans l'eau ont récemment été abaissés aux États-Unis. Si le Canada imite cette décision, cela multipliera le nombre de régions du pays contraintes à chercher d'autres sources d'approvisionnement en eau ou à mettre en place des systèmes de traitement avancés.

Il existe au Canada de nombreux cas où des propriétaires de puits privés ou municipaux soupçonnent les activités commerciales, industrielles ou de mise en valeur des ressources d'avoir causé une détérioration de la qualité des eaux souterraines dans leur localité. Toutefois, à défaut de connaître les concentrations de substances naturelles présentes dans ces milieux, il est très difficile, dans beaucoup de ces cas, de mesurer l'importance du rôle qu'on joué les activités humaines ou même de déterminer si ces activités ont effectivement joué un tel rôle. Comme la qualité des eaux souterraines est étroitement liée à la géochimie des sédiments et du substratum rocheux, nous avons besoin de données sur la qualité des eaux souterraines naturelles pour pouvoir déterminer si la concentration élevée d'un élément quelconque découle de phénomènes naturels ou d'une activité humaine.

Il est possible dans beaucoup de cas de ramener les concentrations de plusieurs substances naturelles (p. ex., métaux, arsenic, salinité, dureté, fluorures) à des niveaux inférieurs aux RQEPC en utilisant diverses méthodes de traitement de l'eau. Par exemple, on peut utiliser l'osmose inverse pour réduire la salinité, et retirer les métaux et les nitrates de l'eau. Toutefois, les concentrations minimales recommandées pour certains éléments sont inférieures à celles qu'il est possible d'obtenir avec les techniques actuelles. En outre, dans certaines régions, les techniques classiques de traitement ne conviennent pas et il n'existe encore aucune méthode de rechange rentable.

Perspectives politiques

La qualité de l'eau des puits municipaux est en général bien réglementée; l'eau y fait l'objet de tests réguliers et les normes sont respectées. Le dépassement des RQEPC entraîne la condamnation des puits. Cependant, les puits privés ne font pas l'objet de règles aussi sévères en ce qui a trait à la fréquence des tests de la qualité de l'eau ou aux normes de qualité à respecter. Beaucoup de provinces mettent actuellement en œuvre des programmes de contrôle de la qualité de l'eau des puits privés et se penchent sur les directives et les règles ayant trait à la construction et à l'emplacement des puits, aux effets de l'eau de surface et du ruissellement, etc. Toutefois, il n'existe encore aucun règlement permettant de condamner un puits privé où la concentration en contaminants aurait été jugée supérieure aux seuils recommandés. Il appartient toujours aux propriétaires de ces puits de décider du degré de qualité qu'ils jugeront acceptable. En conséquence, beaucoup de puits privés canadiens fournissent une eau potable dont les concentrations en diverses substances dépassent les seuils recommandés et justifieraient une condamnation, s'il s'agissait d'un puits municipal. Dans les régions où on reconnaît l'existence de concentrations de contaminants naturels supérieures aux RQEPC, des avis sanitaires devraient être transmis à tous les propriétaires, en particulier avant le forage de puits. Par ailleurs, il existe de petits systèmes de traitement que les propriétaires de puits privés pourraient utiliser pour réduire les teneurs en métaux, la dureté ou la salinité de l'eau, mais aucune réglementation ne les oblige à le faire. Dans certaines régions où les systèmes de traitement classiques ne sont pas efficaces, il conviendrait de mettre en place des programmes pour la mise au point de systèmes de traitement de rechange rentables.

Il convient de mettre en place des programmes de vérification de la qualité de l'eau souterraine dans les

puits privés applicables au fil du temps (pas seulement au moment du forage). On pourrait envisager l'imposition de restrictions ayant trait au forage des puits, ou d'une réglementation sur la profondeur des puits dans les régions où il existe des problèmes sérieux. Par exemple, l'État du Wisconsin interdit le forage de puits dans les régions où il existe des concentrations élevées d'arsenic.

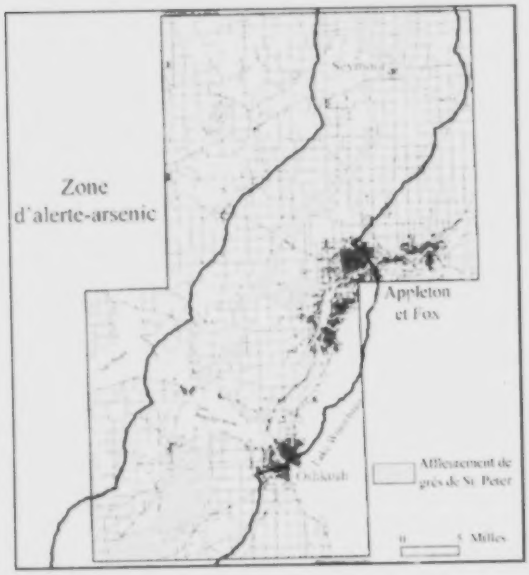

Fig. 2 Exemple d'une réaction proactive des autorités du Wisconsin à un problème de contamination naturelle de l'eau souterraine. Cette carte indique la zone à l'intérieur de laquelle l'eau souterraine présente des teneurs potentiellement élevées en arsenic.

Nous avons besoin de recueillir des données de base sur la qualité des eaux souterraines naturelles avant la mise en valeur de la ressource, tant pour pouvoir mesurer les effets des activités humaines sur la qualité des eaux souterraines naturelles que pour pouvoir prédire comment ces activités influeront sur cette qualité (p. ex., augmentation de la dissolution, intrusion d'eau salée, mobilisations dues à un changement des conditions redox). Si un problème donné est dû aux teneurs naturelles de substances, nous n'aurons d'autre choix que de recourir à des systèmes de traitement coûteux. Par contre, si les problèmes sont liés aux activités humaines, nous pourrons envisager de limiter les activités d'utilisation des terres, ou de modifier ces activités pour protéger ou rétablir la qualité des eaux souterraines.

Références

Santé Canada : Arsenic dans l'eau potable (http://www.hc-sc.gc.ca/francais/vsv/environnement/arsenic.html)

Klassen, R.A., R.G. Garrett et R.N.W. DiLabio. 2001. Sources naturelles de contaminants à l'état de traces. dans : *Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada*. Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ontario), rapport no 1, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE, chapitre 14, p. 77-81.

Mattu, G. et H. Shreier. 2000. *An Investigation of High Arsenic Levels in Wells in the Sunshine Coast and Powell River Regions of B.C.*, Rapport final, préparé pour la Coast Garibaldi Community Health Services Society.

Ptacek, C.J. et D.W. Blowes. 2003. Remediation of groundwater contaminated with arsenic. dans: T.P. Murphy et J Guo (éds), *Arsenic Toxicity and Treatment*. Backhuys Press, Amsterdam, p. 139-157.

2.4 Barrières d'argile pour bloquer le passage des contaminants

Contexte général

On utilise les barrières d'argile pour empêcher le passage des contaminants dans l'eau souterraine. Les barrières artificielles en argile sont largement utilisées dans les sites d'enfouissement, les sites d'élimination de déchets dangereux, les sites d'entreposage du fumier des exploitations porcines ou bovines, les étangs de résidus miniers, les fosses à saumure résiduelle des installation d'extraction de la potasse, etc. Les dépôts naturels d'argile situés à la surface ou près de la surface du sol sont également largement reconnus comme des barrières efficaces contre la migration verticale des contaminants, notamment en milieux ruraux. On choisit souvent les zones caractérisées par des dépôts abondants et épais d'argile pour l'aménagement d'aires d'évacuation des déchets.

Les dépôts d'argile naturels et les tills riches en argile sont largement répandus dans toutes les provinces du Canada. Ces terrains sont également connus sous le nom d'aquitards puisqu'ils bloquent l'écoulement de l'eau souterraine et qu'il est donc difficile d'y puiser de l'eau. Les puits forés dans l'argile ou dans les tills argileux ne donnent qu'un approvisionnement très limité en eau.

On se rend compte aujourd'hui de l'importance grandissante de ces dépôts pour les secteurs minier et agricole ainsi que pour les administrations provinciales et locales qui cherchent à limiter la migration des contaminants en utilisant des barrières naturelles ou artificielles. C'est ainsi qu'on a commencé à s'intéresser de plus en plus à la recherche sur les processus physiques, chimiques et biologiques qui régissent la migration des contaminants dans ces milieux. Par exemple, l'importance des recherches intensives et

spécifiques sur les caractéristiques des dépôts riches en argile a été soulignée par un atelier international sur ce sujet, organisé en 2001 par la National Academy of Science des États-Unis.

Questions principales

L'argile peut bloquer efficacement le passage des contaminants des eaux de surface aux eaux souterraines. Les industries et les administrations publiques comptent de plus en plus sur les barrières d'argile naturelles pour limiter la migration des contaminants dans les milieux naturels, et sur les barrières artificielles pour l'aménagement des aires d'évacuation ou d'entreposage des eaux usées. Toutefois, les barrières d'argile naturelles ou artificielles peuvent se fissurer, et permettre ainsi aux contaminants d'atteindre les réserves d'eaux souterraines.

Argiles naturelles

La composition des dépôts d'argile naturels est assez variable. Ces dépôts sont constitués de deux couches : une couche oxydée et fissurée supérieure qui s'étend jusqu'à 5 mètres sous la surface, et une couche non oxydée inférieure. La couche non oxydée est en général non fissurée, mais il peut arriver que des fissures de la couche supérieure se prolongent jusqu'à une profondeur de 10 à 20 mètres dans la couche non oxydée.

Les recherches ont également montré que des réactions biologiques et chimiques peuvent retarder la migration des contaminants minéraux et organiques dans l'argile. Les réactions biologiques sont régies par l'activité microbienne, comme la dénitrification. Les réactions chimiques dépendent d'activités non biologiques, comme la sorption, l'échange et la précipitation.

Caractéristiques des argiles non fissurées

Les argiles non fissurées se caractérisent en particulier par :

1. la présence de matériaux géochimiques non oxydés;
2. une conductivité hydraulique très faible, généralement inférieure à $5x10^{-10}$ m/s (la conductivité hydraulique d'un dépôt de sable à granulométrie moyenne est d'environ $1x10^{-4}$ m/s);
3. un écoulement de l'eau souterraine vers le bas à une vitesse linéaire moyenne de moins de 1 m par 1 000 ans;
4. la présence de divers traceurs isotopiques donnant à conclure que l'âge de l'eau peut atteindre des dizaines de milliers d'années;
5. des résultats d'études menées sur le terrain et en laboratoire et qui laissent conclure que la diffusion est le principal mécanisme de transport du soluté dans les dépôts argileux non altérés par l'érosion.

Caractéristiques des argiles fissurées

Les argiles fissurées se caractérisent en particulier par :

1. la présence de zones géochimiques oxydées;
2. une conductivité hydraulique généralement cent à mille fois plus grande que celle des argiles non altérées;
3. un écoulement de l'eau souterraine plus rapide dans les fissures que dans les argiles non fissurées;
4. Un écoulement dynamique latéral de l'eau souterraine;
5. la présence de traceurs isotopiques donnant à conclure que l'eau est jeune;
6. des résultats d'études laissant conclure que l'advection par les fissures (avec diffusion dans la matrice) est le principal mécanisme de transport des contaminants dans les argiles altérées.

État des connaissances

Les recherches actuelles portent à conclure que les dépôts naturels non fissurés riches en argile et les barrières d'argile artificielles peuvent permettre de réduire au minimum les risques de contamination de l'eau souterraine à partir de sources tant ponctuelles que diffuses situées au-dessus des aquifères. Nous savons cependant que les argiles sont souvent fissurées et que ces fissures peuvent permettre le transport des contaminants. Par ailleurs, les argiles non fissurées n'empêchent pas complètement le transport des contaminants; elles ne font que le ralentir. Cependant, comme la diffusion est le principal mécanisme de transport dans les argiles non fissurées, les contaminants ne s'y déplaceront qu'à une vitesse inférieure à 1 mm par année. En outre, des réactions chimiques et biologiques devraient dans la plupart des cas ralentir encore davantage la migration des contaminants inorganiques et organiques.

Nous savons qu'une couche d'argile située entre une source de contaminant et un aquifère aura pour effet de bloquer la migration du contaminant dans l'aquifère. Nous savons également que les dépôts d'argile, une fois contaminés, peuvent devenir des sources de contamination à long terme de l'eau souterraine. Les contaminants présents dans les sites d'évacuation ou de stockage des déchets peuvent pénétrer dans l'argile par diffusion. Les contaminants provenant des déversements peuvent également pénétrer de la même manière dans les dépôts d'argile naturels. Une fois supprimée la source extérieure de contaminants, la diffusion jouera dans le sens inverse et les contaminants présents dans l'argile reviendront dans l'aquifère. Ainsi, comme la

diffusion est un processus lent, la contamination qui en découle risquera de persister pendant des décennies ou plus longtemps encore.

Les études récentes ont cerné les domaines de connaissances dont l'importance est grandissante eu égard aux impacts de ces réactions sur les contaminants présents dans les argiles. Par exemple, des études préliminaires montrent que : 1) la migration de certains métaux dans les argiles peut être accélérée par sorption sur du carbone organique mobile dissous; 2) les réactions biologiques in situ n'exercent peut-être pas d'impact mesurable sur l'atténuation des contaminants présents dans les argiles; 3) les bactéries ne migrent probablement pas dans les dépôts d'argiles non fissurés, mais elles peuvent se déplacer en empruntant les fissures dans les dépôts d'argile.

Problèmes à élucider

Pour bien connaître les possibilités offertes par les barrières naturelles d'argile, nous devrons poursuivre les recherches dans les domaines essentiels suivants : 1) mesure de l'étendue de la fissuration dans les dépôts d'argile de dimensions régionales; 2) mesure de l'impact des réactions biologiques sur la migration des contaminants; 3) mesure de l'impact du transport des contaminants (p. ex., métaux) facilité par le carbone organique dissous; 4) mesure des interactions entre les contaminants dissous et la matrice riche en argiles, ainsi que des effets de ces interactions sur la migration de contaminants potentiels; 5) caractérisation de la répartition des bactéries dans l'argile.

Malheureusement, les recherches sur les milieux argileux sont techniquement difficiles et très coûteuses. Les fissures sont difficiles à localiser, en particulier en profondeur. Il faut en outre beaucoup de temps pour caractériser le milieu hydrogéologique des argiles puisque l'écoulement et le transport dans ce milieu sont extrêmement lents. Peu d'études ont donc été entreprises sur ces questions. On peut recourir à des isotopes naturels stables pour déterminer l'emplacement possible des fissures dans l'argile et les endroits où la diffusion constitue le mécanisme de transport dominant. Les isotopes de l'eau (deutérium et oxygène-18) permettent de déterminer les conditions atmosphériques qui régnaient lors de la diffusion de l'eau dans l'argile. Par exemple, les teneurs atmosphériques en deutérium ont atteint des niveaux beaucoup plus élevés au cours des années 50 qu'au cours des décennies antérieures et postérieures, et on peut suivre à la trace la diffusion vers le bas dans les dépôts d'argile de l'eau ainsi marquée.

Perspectives politiques

L'information sur les mécanismes régissant le transport des contaminants dans les argiles peut être communiquée avec un certain degré de certitude aux décideurs et au public. Toutefois, compte tenu du caractère précoce des recherches sur les réactions biologiques et chimiques et sur leurs conséquences pour le transport des contaminants, il est encore trop tôt pour transmettre aux décideurs des conclusions tirées de ces recherches.

À l'heure actuelle, le financement ne semble pas constituer un obstacle pour la mise en œuvre des programmes de recherche jugés essentiels. Étant donné les caractéristiques de ces argiles et le coût élevé en temps et en matériel de ces recherches, c'est le temps nécessaire à la formulation de conclusions valides qui constituera le facteur déterminant de la réussite dans ce domaine de recherche.

L'existence de dépôts d'argile naturels à la surface ne signifie pas toujours qu'il existe une barrière capable de bloquer le passage des contaminants. Ces dépôts sont très souvent fissurés, et ces fissures peuvent permettre aux contaminants d'atteindre les aquifères. Il faut tenir compte de ce problème pendant la conduite d'activités qui risquent d'influer sur la qualité des eaux souterraines (p. ex., localisation des sites d'élimination des déchets, délimitation des zones de protection de l'eau souterraine, etc.).

Nous savons par ailleurs que les barrières d'argile artificielles utilisées pour les sites d'évacuation ou de stockage des déchets peuvent également comporter des fissures et qu'elles risquent donc de laisser passer des contaminants. On a observé dans beaucoup de ces sites des fuites qui provoquent une contamination des eaux souterraines. En conséquence, avant de recourir à l'aménagement de barrières d'argile pour les installations d'élimination ou de stockage des déchets, ou d'entreprendre des projets d'utilisation des terres qui exigent une barrière de protection contre la contamination de l'eau souterraine, il conviendra de procéder à une étude complète de l'argile en profondeur pour vérifier l'existence possible de fissures. Nous avons besoin de meilleures pratiques de gestion pour éviter que ces sites ne deviennent des sources de contamination des eaux souterraines.

Références

Kellen, C.J., L. Wassenaar et M.J. Hendry. 2001. Stable isotopes of pore waters in clay-rich aquitards: a comparison and evaluation of measurements techniques. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 21(2):108-116.

Wassenaar, L. and M.J. Henry. 1999. Improved piezometer construction and sampling techniques to determine pore water chemistry in aqitards. *Ground Water*, 37(4):564-571.

2.5 Agents pathogènes dans les eaux souterraines

Contexte général

En mai 2000, l'approvisionnement en eau de la ville de Walkerton (Ontario) a été contaminé par des bactéries, provoquant la maladie de plus de 2 000 personnes et 6 décès. On a déterminé que cette contamination bactérienne provenait d'une source agricole située en amont d'un puits municipal mal conçu. Cet incident a suscité auprès du public de vives inquiétudes au sujet des risques que peut présenter la contamination bactérienne des eaux souterraines. Pourtant, les bactéries ne sont pas les seuls organismes capables de contaminer l'eau souterraine et de menacer la santé humaine. Il en existe d'autres types, que l'on désigne par le terme collectif d'agents pathogènes.

Les agents pathogènes représentent la principale cause des maladies transmises par l'eau. Les personnes qui dépendent des eaux de surface (lacs, rivières, réservoirs) pour s'approvisionner en eau potable sont les plus exposées à ce type de contaminant. On s'inquiétait peu, par le passé, du risque posé par ces organismes dans l'eau potable provenant de sources souterraines puisque rares étaient les municipalités qui avaient connu des difficultés avec ce type de contamination.

Questions principales

Les réserves d'eau souterraine les plus exposées à la contamination par les agents pathogènes sont celles qui dépendent 1) de puits peu profonds; 2) de puits mal construits; 3) de puits forés dans des aquifères directement reliés à une source d'eau de surface; ou 4) de puits mal entretenus. Comme les agents pathogènes ne peuvent généralement pas franchir de grandes distances à travers des sédiments fins (argile, limon ou sable),) la protection des réserves d'eau devrait s'appuyer avant tout sur 1) la construction des puits et 2) les pratiques de gestion des déchets. Comme on ne relève encore que peu de cas de municipalités ayant eu à faire face à un problème de contamination de leur source d'approvisionnement en eau souterraine, le transport et la persistance des agents pathogènes sous la surface du sol restent des phénomènes mal connus. La plupart des études ont mis l'accent sur les bactéries, et rares sont celles qui ont examiné le transport et le devenir des virus et des protozoaires. Or, les virus et les protozoaires des eaux souterraines se comportent très différemment des bactéries, et survivent notamment plus longtemps que ces dernières.

Sources d'agents pathogènes dans les eaux souterraines

Les matières fécales et les systèmes d'évacuation des déchets — y compris les tas de fumier et les lagunes à fumier, les fosses septiques, l'épandage du fumier et des biosolides — constituent les principales sources d'agents pathogènes dans l'eau souterraine des régions agricoles. Ces déchets contiennent des nombres considérables d'agents pathogènes. Par exemple, un litre d'eau usée communautaire peut contenir de 3 à 20 000 ookystes de *Cryptosporidium*, de 10 000 000 à 100 000 000 coliformes fécaux et de 1 000 à 10 000 entérovirus. L'enfouissement sanitaire et les animaux morts (p. ex., souris) dans les puits compte parmi les autres sources connues.

Tableau 2 : Agents pathogènes préoccupants

Bactéries	Virus	Protozoaires
Escherichia coli	Rotavirus	*Kystes de Giardia lamblia*
Salmonella	Poliovirus	*Ookystes de Cryptosporidium parvum*
Shigella	Adénovirus	
Campylobacter jejuni	Virus de Norwalk	
Yersinia enterocolitica	Hépatite A	
Vibrio cholerae		
Helcobacter		
Enterococci		

Les agents pathogènes peuvent gagner les eaux souterraines de diverses façons, y compris par infiltration jusqu'à la nappe phréatique, par écoulement direct de la surface jusqu'à la nappe phréatique par les fractures du substratum rocheux ou du till, par les puits mal construits ou mal entretenus et par les trous de forage non bouchés, ou par transport direct des sites souterrains d'évacuation d'eaux usées aux puits.

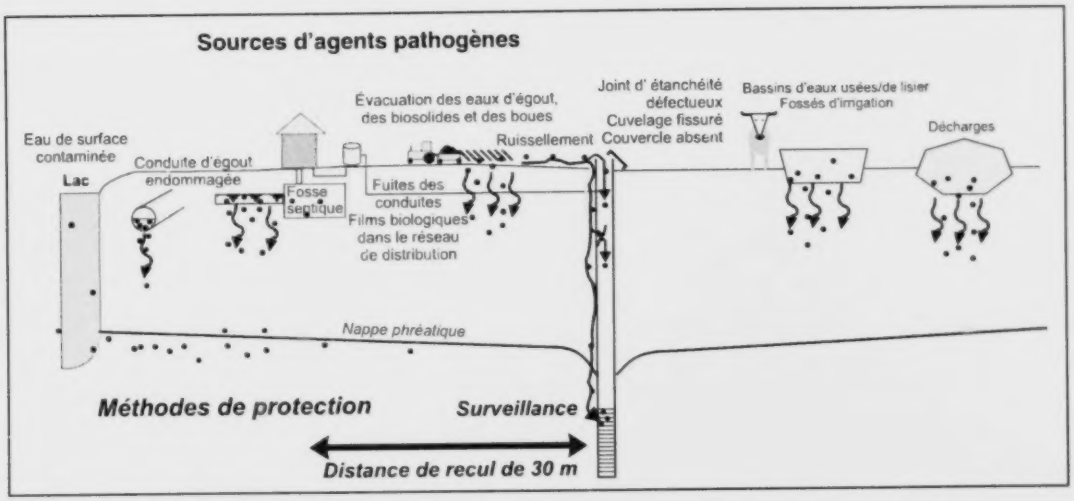

Fig. 3 Sources rurales, agricoles, municipales et naturelles possibles de contamination des eaux souterraines par les agents pathogènes.

Transport et survie des agents pathogènes

Pour protéger les réserves publiques d'eau souterraine, il est essentiel de connaître les facteurs qui déterminent la survie et le transport des agents pathogènes sous la surface du sol jusqu'aux sources d'approvisionnement en eau. Ces facteurs se répartissent en trois grandes catégories :

1. propriétés du sol ou du matériau constituant de l'aquifère (granulométrie, taille et connectivité des pores, fractures, composition minéralogique, revêtements d'oxydes métalliques, quantité de matière organique);
2. propriétés de l'eau souterraine (force ionique, pH, température, vitesse d'écoulement);
3. propriétés de l'agent pathogène (taille, composition de la surface, taux de mortalité, taux de reproduction, taux d'inactivation).

Les agents pathogènes sont transportés par l'eau; leur propagation dépend donc de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine. En conditions naturelles, cette vitesse est d'ordinaire plus grande dans les matériaux plus grossiers comme le gravier (10 – > 100 m/j), les roches fracturées (1 – > 10 000 m/j) et le sable (0,05 – 1 m/j) que dans les limons et les argiles à grains fins (< 0,01 – 0,05 m/j). Toutefois, elle augmente d'une manière exponentielle à mesure qu'on s'approche d'un puits dont l'eau est pompée. Par ailleurs, des températures plus fraîches favorisent la survie des agents pathogènes dans l'eau souterraine.

La granulométrie du matériau constituant de l'aquifère (et, par ricochet, la taille des interstices) influe sur la filtration des agents pathogènes. Les interstices trop fins bloquent le passage des organismes plus gros. La taille des pores des limons et des argiles (< 0,3 μm) bloque les bactéries (1 – 5 μm) et les protozoaires (4 – 14 μm), mais laisse libre passage à certains virus (0,02 – 0,9 μm). Le sable (5 μm) permet la circulation de certaines bactéries. Les graviers (> 100 μm) et les fractures (> 10 μm) permettent la libre circulation de tous les agents pathogènes.

En vertu de leurs propriétés physiques et biologiques, les agents pathogènes se déplacent de préférence fixés sur les matériaux de l'aquifère au lieu de flotter librement dans l'eau souterraine. Cette caractéristique limite l'étendue et la vitesse de leur propagation et réduit leurs concentrations dans l'eau souterraine.

En conséquence, les cas de contamination des eaux souterraine par lixiviation des agents pathogènes à travers les sols argileux ou limoneux sont rares. Ce genre de contamination surviendra plus vraisemblablement dans les graviers, les sables grossiers ou les roches fracturées. Les agents pathogènes qui contaminent une source donnée d'eau souterraine auront besoin de conditions très favorables (gravier grossier, fractures, grande vitesse d'écoulement) pour migrer sur de grandes distances. Même lorsque ces conditions sont réunies, la migration se limite selon les observations à une distance de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. La contamination bactérienne des puits est un phénomène commun;

les études laissent conclure que la proportion des puits ruraux contaminés par des bactéries au Canada varie entre 10 et 36 %. Dans beaucoup de cas, ces bactéries sont transportées dans l'eau de ruissellement contaminée qui pénètre dans les puits à la surface (à cause de dispositifs d'étanchéité inadéquats, de fissures dans le cuvelage ou de fractures qui relient directement la surface à la prise d'eau du puits). Nombre des autres puits contaminés sont des puits peu profonds, mal situés (p. ex., forés dans du gravier ou des roches fracturées laissant libre passage au ruissellement de surface, au voisinage d'un système septique, d'un tas de fumier, etc.), mal construits (trou de forage mal bouché, exposé au ruissellement en surface, etc.) ou mal entretenus (pas de couvercle, corrosion du cuvelage, etc.). Toutefois, on ignore combien de puits sont contaminés par des bactéries transportées à partir des aquifères.

État des connaissances

Les agents pathogènes (bactéries) sont des contaminants communs des puits ruraux au Canada, et en particulier des puits peu profonds. Les matières fécales et les systèmes d'évacuation des déchets (fumier, biosolides, fosses septiques) constituent les sources principales de ce type de contamination. Les aquifères vulnérables sont ceux situés près de la surface (nappe phréatique peu profonde, pas de couche perméable basse entre la surface et la nappe phréatique,) et qui sont composés de matériaux très perméables comme du gravier ou des roches fracturées.

Beaucoup d'agents pathogènes, y compris les bactéries coliformes et les virus, peuvent survivre pendant plus d'un an dans l'eau souterraine. Le sable grossier, le gravier et les roches fracturées permettent à la plupart des agents pathogènes de passer de la surface à la nappe phréatique et de franchir des centaines de mètres avec l'écoulement de l'eau souterraine. Toutefois, les bactéries et les virus préfèrent s'attacher aux matériaux constituants des aquifères, ce qui empêche leur transport sur de grandes distances et limite leur concentration dans l'eau souterraine.

Problèmes à élucider

Nous savons que de nombreux puits sont contaminés par des bactéries, mais nous ignorons de quels types de bactéries il s'agit (p. ex., bactéries pathogènes à Walkerton (Ontario), *E. coli 0157:H7*). Nous ne savons pas grand chose non plus des virus ni des protozoaires présents dans les puits.

De nombreuses études ont été réalisées en laboratoire pour évaluer le transport et la survie des agents pathogènes dans les systèmes d'eau souterraine, mais il est très difficile d'interpréter leurs résultats à la lumière des conditions qui existent sur le terrain puisqu'il est impossible de reproduire dans un test de laboratoire les conditions physiques, chimiques et biologiques complexes du milieu naturel. Peu d'études ont été réalisées sur des sites contrôlés afin de déterminer les modes de propagation des agents pathogènes dans les systèmes d'eau souterraine et leur durée de survie. Nous connaissons donc mal cette propagation, notamment en ce qui a trait aux virus et aux protozoaires.

Il n'existe aucun modèle largement reconnu et exhaustif de simulation informatisé du transport et du devenir des agents pathogènes dans l'eau souterraine grâce auquel nous pourrions prédire d'une manière précise et évaluer le transport et le devenir d'une gamme d'agents pathogènes sous une variété de conditions du milieu.

Le remplacement graduel des petites exploitations d'élevage ou de production mixte par de vastes opérations d'élevage intensif (p. ex., porcs, bovins, poulets) est une source de préoccupations sérieuse. Nous ignorons quel pourra être l'impact, sur la qualité des eaux souterraines, d'une charge potentiellement énorme de contaminants (en particulier, de fumier) sur une faible superficie, et les distances que ces contaminants pourront franchir.

Perspectives politiques

La menace qui pèse sur les eaux souterraines rurales augmentera à l'avenir à mesure que se multiplieront les sources d'agents pathogènes dans les régions rurales. L'évolution de l'industrie agricole privilégie les entreprises d'élevage intensif du bétail. Les municipalités ont de plus en plus recours à l'épandage des biosolides dans les régions rurales. Le nombre de fosses septiques a augmenté au cours des dernières décennies à cause de la croissance des populations vivant en milieu semi-rural et près de l'eau. En conséquence, les politiques doivent promouvoir l'élaboration et la mise en œuvre d'une approche à barrières multiples (ABM) pour la protection des eaux souterraines rurales contre les agents pathogènes, notamment par 1) l'adoption de règles sur la gestion des déchets; 2) le renforcement des lignes directrices sur la qualité de l'eau; 3) l'analyse de la sensibilité des aquifères; 4) l'adoption de règlements sur les fosses septiques et les distances de recul; 5) le contrôle de l'eau de source; 6) des épreuves de la qualité des eaux souterraines et des puits; 7) l'adoption de normes minimales de construction et d'entretien des puits.

Les règles et les recommandations actuellement en vigueur pour protéger la qualité de l'eau (RQEPC, règlements sur les distances de recul pour les fosses septiques, etc.) sont fondées uniquement sur les caractéristiques des bactéries coliformes. Or, les bactéries ne se comportent pas toutes de la même façon, et les virus et les protozoaires jouissent de taux de survie très supérieurs. Les études ont laissé constater des variations dans les caractéristiques de la propagation des virus et des bactéries. Dans certains sites, les virus sont transportés plus loin que les bactéries alors qu'ailleurs, c'est l'inverse qui se produit. Les règles et les recommandations fondées sur les bactéries coliformes ne peuvent donc pas protéger adéquatement l'eau potable contre la contamination par les virus et les protozoaires. Il convient donc de formuler de nouvelles règles concernant la distance de recul pour les puits et d'élaborer de nouvelles recommandations pour la qualité de l'eau et pour les méthodes d'essais adaptées à une gamme d'agents pathogènes autres que les bactéries coliformes.

Les règles concernant la qualité de l'eau et la fréquence des tests sur les puits sont axées sur les systèmes municipaux. Il n'existe aucune réglementation pour le contrôle de la qualité de l'eau des puits privés. La plupart des provinces recommandent que les propriétaires de puits contrôlent la qualité de l'eau de leurs puits au moment du forage, et une fois l'an par la suite, mais il n'existe aucun règlement à cet effet. On utilise souvent dans les régions rurales des puits privés dont l'eau est de piètre qualité et dont les teneurs en contaminants sont supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC pour les systèmes municipaux d'approvisionnement en eau. Nous avons besoin de politiques et de règlements pour assurer l'application des recommandations pour la qualité de l'eau, améliorer les protocoles d'analyse de l'eau souterraine et assurer la mise en vigueur de normes minimales de qualité pour la construction et l'entretien des puits ruraux.

Nous devons en outre chercher à mieux connaître les principaux facteurs qui influent sur le transport et la survie des bactéries, des virus et des protozoaires dans les aquifères et dans les puits, et élaborer et mettre en œuvre des règlements à ce propos. De telles recherches nécessiteront peut-être la mise au point de nouveaux outils et de nouvelles méthodes pour l'échantillonnage, la détection et la caractérisation des agents pathogènes qui ne font actuellement l'objet d'aucun test normalisé. Il convient de souligner en particulier que nos connaissances sur la survie des virus et des protozoaires dans l'eau souterraine restent très limitées.

Références

Maier, R.M., I.L. Pepper et C.P. Gerba. 2000. *Environmental Microbiology*. Academic Press, San Diego.

U.S. EPA. 2000. CFR Title 40, sous-partie S, parties 141 et 142, RIN 2040-AA97 National Drinking Water Regulations, Ground Water Rule.

Harvey, R. W. et H. Harms. 2002. Transport of microorganisms in the terrestrial subsurface: *in situ* and laboratory methods. dans: *Manual of Environmental Microbiology*, 2e édition, ASM Press, Washington, D.C.

2.6 Incidences de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines

Contexte général

Le public avait tendance par le passé à tenir pour acquise la bonne qualité des eaux souterraines dans les régions rurales, mais depuis la tragédie de Walkerton, en Ontario, les gens sont plus sensibles aux problèmes de contamination des eaux souterraines dans les régions agricoles. Beaucoup d'activités agricoles ont un impact sur la quantité et la qualité des eaux souterraines disponibles, et cette ressource influe en retour sur la viabilité des activités agricoles. Les éleveurs et les agriculteurs ont tendance à se montrer sensibles aux problèmes de qualité et de quantité des eaux souterraines et ce, pour diverses raisons. Premièrement, la plupart dépendent de cette ressource pour abreuver leurs animaux et irriguer leurs champs. Deuxièmement, environ 90 % des Canadiens vivant en zones rurales dépendent des eaux souterraines pour leurs besoins domestiques en eau potable. Troisièmement, ils sont responsables de veiller à leurs propres besoins puisqu'ils entretiennent leurs propres puits (ils ne dépendent pas d'un approvisionnement municipal ou communautaire). En conséquence, ils sont d'ordinaire les premiers à subir les impacts d'une variation de la qualité des eaux souterraines due à la contamination.

Diverses activités agricoles comme la pulvérisation de pesticides, l'épandage d'engrais et de fumier, le stockage et l'évacuation des déchets d'origine animale, l'élimination inadéquate et les déversements de substances chimiques et l'irrigation influent sur la qualité des eaux souterraines dans les régions agricoles. On peut diviser les contaminants de l'eau souterraine provenant de ces activités en trois grandes catégories : les nitrates, les bactéries et les pesticides. D'autres facteurs comme les fosses septiques domestiques, les puits mal construits ou abandonnés et la manutention, l'entreposage et l'élimination inadéquates des carburants et des substances chimiques peuvent également influer sur la qualité

des eaux souterraines. Les fosses septiques constituent en outre une importante source de contamination puisque ces dispositifs et les puits sont en général installés assez près l'un de l'autre dans la plupart des fermes et des résidences rurales.

Même si les activités rurales ont entraîné avec le temps une baisse de la qualité des eaux souterraines, la plupart des régions respectent toujours les RQEPC. Cependant, dans certaines régions du Canada (p. ex., les Prairies), les eaux souterraines sont naturellement de piètre qualité ou proche des seuils recommandés pour la consommation humaine et animale et pour l'irrigation des cultures à cause des concentrations élevées de sulfates ou de sels qu'elles contiennent. Toute dégradation supplémentaire de la qualité des eaux souterraines dans ces régions risque donc de limiter gravement les activités agricoles.

Questions principales

La contamination des eaux souterraines due aux activités agricoles est un problème largement répandu dans toutes les régions agricoles du Canada. Les tests de la qualité des eaux souterraines effectués dans les puits ruraux d'un bout à l'autre du Canada laissent communément constater la présence dans ces puits de nitrates, de bactéries ou de pesticides.

Contaminants dans les régions agricoles

Les contraintes économiques ont forcé les producteurs à concentrer les activités d'élevage du bétail, ce qui augmente le risque d'impact de la gestion des engrais de ferme sur la qualité de l'eau souterraine. Par exemple, en Ontario, le nombre de producteurs de porcs enregistrés est passé de 20 000 en 1980 à 4 200 en 2002, mais le nombre total de porcs produits annuellement a augmenté d'environ 5 %. La production de fumier augmente, mais les superficies utilisées pour l'épandage diminuent. Les zones les plus exposées (celles qui ont subi les impacts les plus lourds) à l'élevage intensif du bétail sont situées dans le sud de la Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario, au Québec et dans certaines régions de l'I.P.-É, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse. On s'inquiète en particulier des incidences possibles de l'épandage de fumier dans les zones sensibles d'alimentation des nappes souterraines, près des eaux de surface et près des puits en exploitation ou abandonnés.

Certaines activités provoquent une contamination sur des superficies de plusieurs kilomètres carrés qu'on désigne sous le nom de contamination non localisée. Il peut s'agir par exemple de la pulvérisation de pesticides ou de l'épandage d'engrais ou de fumier dans les champs. D'autres activités provoquent au contraire une contamination très localisée; ce sont des sources ponctuelles de contamination comme les fosses septiques et les déversements de carburant).

Nitrates

Les nitrates qui aboutissent dans l'eau souterraine des régions agricoles viennent principalement des engrais et du fumier utilisés dans les champs, de l'eau de ruissellement contaminée par les sites de stockage de déchets d'origine animale, et des fosses septiques. On ajoute de l'azote aux sols pour maintenir la production végétale. Les surplus d'azote sont convertis en nitrates (forme soluble de l'azote) qui finissent par atteindre la nappe phréatique par lixiviation. La contamination par les nitrate peut venir de sources non localisées (épandage d'engrais et de fumier) ou de sources ponctuelles (fosses septiques, sites de stockage des déchets)

Bactéries

Les bactéries qui se trouvent dans l'eau souterraine des régions agricoles viennent principalement du fumier utilisé dans les champs, de l'eau de ruissellement contaminée par les sites de stockage des déchets et des fosses septiques. Le fumier, en particulier, en contient de grandes quantités, dont certaines sont pathogènes pour les humains. La contamination bactérienne peut provenir de sources non localisées (épandage de fumier dans les champs) et de sources ponctuelles (sites de stockage des déchets, fosses septiques). La propagation des bactéries est limitée dans les sols à grains fins et le sable. Les bactéries peuvent cependant atteindre la nappe phréatique en passant par les crevasses et les fissures dans l'argile et dans le roc. En conséquence, les cas de contamination généralisée des eaux souterraine par lixiviation des bactéries de la surface ou par transport dans les aquifères à partir de puits contaminés sont rares. Les cas de contamination bactérienne des puits sont communs, mais la vaste majorité des puits ainsi contaminés sont peu profonds, mal situés, mal construits ou mal entretenus. La contamination bactérienne des puits peu profonds est en général causée non pas par l'eau souterraine venant de l'aquifère, mais plutôt par l'eau de ruissellement de surface qui pénètre dans le puits à la surface de saturation (à cause de dispositifs d'étanchéité inadéquats, de fissures dans le cuvelage, de corps étrangers ou de fractures qui relient directement la surface à la prise d'eau.

Pesticides

Les pesticides qui se trouvent dans l'eau souterraine des régions agricoles viennent des herbicides, des

insecticides et des fongicides utilisés dans les champs. La contamination peut provenir de sources non localisées (pulvérisations de pesticides dans les champs) ou de sources ponctuelles (élimination inadéquate des déchets, nettoyage des équipements, déversements, etc.).

État des connaissances

La contamination des eaux souterraines et des puits due aux activités agricoles est un problème commun dans toutes les régions agricoles du Canada. Elle peut être causée par une combinaison d'activités agricoles, de conditions du sol et de l'eau souterraine, de conditions météorologiques, de caractéristiques de construction des puits, et de conditions topographiques et hydrologiques.

On observe communément, partout au Canada, des concentrations de nitrates supérieures aux RQEPC. Les études donnent à conclure que le tiers environ des puits des régions agricoles contiennent des concentrations de nitrates supérieures aux seuils recommandés. Elles laissent constater par ailleurs que la proportion des puits ainsi contaminés varie peu avec le temps. On relève à l'occasion la présence d'un ou de plusieurs pesticides dans l'eau souterraine et dans les puits utilisés localement, mais rarement à des concentrations proches ou supérieures aux seuils recommandés. Ce type de contamination est en général causé par une utilisation locale, et la fréquence et la gravité des cas observés varient énormément d'une région à l'autre. La plupart des cas de forte concentration de pesticides dans l'eau souterraine sont dus à des déversements.

Étant donné les caractéristiques des bactéries, la possibilité d'une contamination bactérienne générale d'un aquifère reste peu probable. Toutefois, les risques d'une contamination bactérienne passant par des puits peu profonds et atteignant la nappe phréatique sont beaucoup plus élevés (ils sont beaucoup moindres dans le cas des puits profonds forés dans des aquifères confinés). Les défauts de construction et le mauvais choix du site sont des causes communes de la contamination bactérienne des puits peu profonds. On ignore toutefois la fréquence des cas de contamination des puits par l'eau provenant d'un aquifère voisin contaminé. Les bactéries qui aboutissent dans un puits peu profond proviennent d'ordinaire 1) de l'eau de ruissellement de surface ou 2) d'un corps étranger. L'eau de ruissellement contaminée pénètre dans les puits par les joints d'étanchéité abîmés du cuvelage, des interstice causés par la corrosion ou des fractures qui exposent directement le puits à l'eau de surface, etc. La proportion des puits contaminés par des bactéries varie d'une région agricole à l'autre au Canada de 9 à 43 %, et les études montrent que la proportion des puits ainsi contaminés a augmenté entre 1954 et 1992. Toutefois, il n'existe pas de lien direct entre le degré de contamination des eaux souterraines et des puits et les diverses pratiques agricoles.

Problèmes à élucider

Les études réalisées en conditions réelles nous ont déjà fourni beaucoup de données sur les types de contamination des eaux souterraines, leurs sources, leur propagation et leur persistance. Toutefois, nous avons besoin d'études supplémentaires réalisées à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques, et de recherches qui rendront mieux compte des liens qui existent entre les caractéristiques des bassins hydrographiques, l'hydrologie superficielle, les eaux souterraines, la météorologie, les propriétés des sols, les pratiques de gestion des exploitations agricoles, etc. Il conviendrait en outre d'évaluer les rejets d'eaux souterraines contaminées dans les cours d'eaux et les zones humides proches des terres agricoles.

Les RQEPC portent sur des pesticides individuels; nous connaissons mal les effets toxiques des combinaisons de plusieurs pesticides. De plus, certains pesticides ne sont même pas pris en compte dans les recommandations. Nous ignorons également quels peuvent être les effets d'une exposition à long terme à des concentrations de nitrates ou de pesticides qui, tout en étant élevées, restent inférieures aux seuils recommandés. Nous savons que de nombreux puits sont contaminés par des bactéries, mais nous ignorons de quels types de bactéries il s'agit (p. ex., bactéries pathogènes à Walkerton (Ontario), *E. coli 0157:H7*). Nous ignorons également s'il est possible que les familles rurales exposées depuis longtemps à des bactéries pathogènes deviennent plus résistantes à ces bactéries que les familles moins fréquemment exposées. Nous avons besoin d'en savoir plus sur la capacité de survie des bactéries dans l'eau souterraine et l'eau des puits, et d'élaborer des stratégies permettant d'éviter cette survie. Nous avons enfin besoin d'élaborer des pratiques agricoles qui permettront de réduire ou d'éviter la contamination de l'eau souterraine (p. ex., déterminer l'apport maximal écologiquement viable de nitrates pour la protection des eaux souterraines dans les zones agricoles).

Le remplacement graduel des petites exploitations d'élevage ou de production mixte par de vastes opérations d'élevage intensif est une source de préoccupations sérieuse. Nous ignorons quel pourra être l'impact, sur la qualité des eaux souterraines, d'une

charge potentiellement énorme de contaminants (en particulier, de fumier) sur une faible superficie ainsi que les distances que ces contaminants pourront franchir.

Perspectives politiques

Nous en savons en général suffisamment pour définir les meilleures pratiques de conservation des sols, de gestion des déchets et d'utilisation des pesticides et des engrais qui nous permettront d'éviter les problèmes futurs de contamination des eaux souterraines. Par ailleurs, nos connaissances sur les types de contamination, leurs sources, et le transport et la rémanence des produits contaminants dans l'eau souterraine sont bonnes. La plupart des recherches du passé ont été conduites essentiellement à l'échelle du site ou du champ. Nous avons besoin d'études menées à l'échelle de la région ou du bassin hydrographique, et qui rendront mieux compte des liens qui existent entre les caractéristiques du bassin hydrographique, l'hydrologie superficielle, les eaux souterraines, la météorologie, les propriétés des sols, les pratiques de gestion des exploitations agricoles, etc. La plupart des cas de contamination, notamment par des bactéries, sont dus à des pratiques agricoles ou à des méthodes de construction des puits inadéquates.

À mesure que l'industrie agricole continue d'évoluer en favorisant l'élevage intensif du bétail, l'environnement sera exposé à des quantités plus grandes de contaminants déjà connus (p. ex., nitrates et bactéries), et à des contaminants qui nous sont encore inconnus (p. ex., produits pharmaceutiques, virus) et les risques de contamination des eaux souterraines augmenteront. Tous les éleveurs et les agriculteurs (du petit producteur aux vastes entreprises d'élevage intensif du bétail) devraient être tenus d'avoir et de suivre un plan agricole environnemental. De plus, tous les puits devraient faire l'objet de tests réguliers pour le contrôle des concentrations de nitrates, de bactéries et de pesticides. Cependant, le coût d'un programme global et régulier d'échantillonnage et d'analyses serait trop élevé pour les moyens des particuliers et des municipalités. L'Ontario a élaboré une Loi sur la gestion des éléments nutritifs conçue pour protéger les sources d'eau contre le fumier. Cette loi doit s'appliquer à la fois aux grandes entreprises d'élevage du bétail et aux petites exploitations. Étant donné leur grand nombre et leur vaste répartition sur l'ensemble du territoire provincial, les petites exploitations sont responsables de la plus grande partie du volume total de fumier produit en Ontario. Toutefois, étant donné la décision récente des autorités de ne pas obliger les petites exploitations à respecter le délai prescrit, seul le temps permettra de vérifier dans quelle mesure la nouvelle loi aura permis de réduire les teneurs en nitrates de l'eau souterraine.

Il existe des règlements ayant trait aux normes de qualité de l'eau et à la fréquence des tests pour les systèmes de traitement municipaux (de l'eau de surface et de l'eau souterraine). Toutefois, il n'existe rien d'équivalent pour les puits privés. Ainsi, on utilise souvent dans les régions rurales des puits privés dont l'eau est de piètre qualité et dont les teneurs en contaminants sont supérieures aux seuils prescrits par les RQEPC pour les systèmes municipaux d'approvisionnement en eau. Nous avons besoin de politiques et de règlements pour assurer l'application des recommandations pour la qualité de l'eau, améliorer les protocoles d'analyse de l'eau souterraine et assurer la mise en vigueur de normes minimales de qualité pour la construction et l'entretien des puits ruraux.

Références

Chambers, P.A., M. Guy, E.S. Roberts, M.N. Charlton, R. Kent, C. Gagnon, G. Grove et N. Foster. 2001. *Les éléments nutritifs et leurs effets sur l'environnement au Canada*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, Santé Canada et Ressources naturelles Canada, 271 p.

Coote, D.R. et L.J. Gregorich (éds) 2000. *La santé de l'eau : vers une agriculture durable au Canada*. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Publication 2020/F, 173 p.

Crowe, A.S. et P. Milburn (éds). 1995. Contamination of Groundwater by Pesticides in Canada. Numéro spécial du *Water Quality Research Journal of Canada*, 30(3):363-561.

L'agriculture écologiquement durable au Canada – Rapport sur le projet des indicateurs agroenvironnementaux. 2000. Agriculture et Agroalimentaire Canada

Rudolph, D.L., D.A.J. Barry and M.J. Goss. 1998. Contamination of Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture. 2. Results from multilevel monitoring well Installations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 32:295-311.

2.7 Enjeux ruraux et municipaux

Contexte général

La contamination bactérienne de l'eau potable survenue à Walkerton (Ontario) a attiré l'attention du public sur les problèmes de qualité des eaux souterraines dans les régions rurales et poussé les organismes gouvernementaux à prendre des mesures our protéger cette ressource des impacts des activités agricoles. Cependant, les éleveurs et les agriculteurs ne sont pas les seuls, dans les régions rurales, à se trouver en concurrence pour les ressources en eaux

souterraines, et les activités agricoles ne sont pas les seules qui risquent de provoquer la contamination de ces ressources. Il faut aussi songer aux résidents non agricoles et à leurs activités, y compris les habitations résidentielles, les lotissements, les municipalités (du petit village à la grande ville) et aux espaces de loisirs (résidences saisonnières, terrains de camping, parcs, centres de villégiature, etc.). La population entière de l'Île du Prince-Édouard, rurale ou citadine, dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable. Partout au Canada, des villes importantes comme Regina, Kitchener-Waterloo, Winnipeg, Fredericton et Charlottetown dépendent également dans une large mesure de cette ressource.

Questions principales

En plus d'augmenter, la population non agricole qui dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable de qualité risque en retour d'influer sur la qualité de cette ressource. La concurrence pour les ressources en eau souterraine (p. ex., puits ruraux et puits municipaux) et les répercussions négatives qui risquent d'en découler (présence de pesticides dans les puits municipaux et sel de voirie dans les puits ruraux) vont poser un problème grandissant. Il convient donc d'adopter à l'échelle régionale des pratiques de gestion du territoire et des ressources en eaux souterraines qui prendront en compte les activités agricoles, rurales et urbaines, et de mettre à contribution à cette fin les membres du public, les intervenants et les décideurs.

Incidences des municipalités sur l'eau souterraine

L'étalement urbain sur des territoires traditionnellement ruraux et à vocation agricole constitue une menace pour la qualité des eaux souterraines, tant pour les résidents des zones rurales que pour les citadins. La croissance urbaine, où les petits villages se transforment en grandes villes, s'observe partout au Canada. Les régions les plus menacées sont celles où cette croissance est la plus rapide et où les eaux souterraines constituent la source principale d'eau potable des municipalités, comme dans le sud de l'Ontario et au Nouveau-Brunswick. À mesure que les municipalités s'étendent et envahissent les zones agricoles, plusieurs problèmes risquent de se poser. Les décharges sanitaires, les sites industriels actifs ou abandonnés, les sablières et les gravières, les sites d'entreposage ou de vente au détail de carburant, les produits chimiques d'entretien des pelouses, l'épandage de sel sur les routes, les cimetières, les fosses septiques résidentielles et l'épandage sur les terres de biosolides d'origine municipale comptent parmi les activités liées au développement urbain qui risquent de contribuer à la contamination des ressources en eaux souterraines.

Les municipalités qui dépendent de l'eau souterraine ont tendance à aménager leurs puits d'approvisionnement (champs de captage) en zones rurales, à l'écart de possibles sources urbaines de contaminants. Cependant, l'étalement urbain finit souvent par empiéter sur les champs de captage, et à créer ainsi des sources urbaines de contaminants qui se rencontraient peu auparavant en zones rurales. On utilise le sel de voirie sur les routes rurales, mais les volumes nécessaires sont sans commune mesure avec ce qui est requis sur les réseaux routiers denses des régions urbaines. L'urbanisation entraîne également dans son sillage les sites industriels, les stations-service, les déversements et d'autres sources qui risquent de polluer les sources d'approvisionnement en eau. La ville de Kitchener-Waterloo fournit un exemple d'empiétement urbain sur un champ de captage. Le champ de captage de Greenbrook, anciennement situé en zone rurale, se trouve aujourd'hui à l'intérieur des limites de la ville. L'utilisation accrue de sel de voirie qui a accompagné l'expansion du réseau routier a provoqué dans plusieurs puits d'approvisionnement une augmentation constante des concentrations de chlorures, lesquelles dépassent parfois aujourd'hui les seuils recommandés de 250 mg/L (ces concentrations sont passées de 60 mg/L en 1974 à 300 mg/L en 2000). L'eau souterraine doit aujourd'hui être diluée. On a calculé que même si on cessait immédiatement tout épandage de sel sur les routes, la décontamination des aquifères prendrait des décennies. On a même prédit que les concentrations de chlorures dans les puits d'approvisionnement continueraient d'augmenter pendant encore plusieurs années.

La vaste proportion des superficies urbaines rendues imperméables (pavages, toitures, etc.) et un dense réseau d'égouts pluviaux réduisent ou empêchent l'alimentation des nappes d'eau souterraines. Ce phénomène vient perturber de façon dramatique le cycle naturel de remplissage des aquifères (moins d'eaux souterraines pour les champs de captage) et les sources qui alimentent les cours d'eau. Cette réduction du volume d'alimentation des nappes souterraines s'accompagne en outre d'une baisse de la qualité des eaux souterraines. Ce problème s'est posé dans la moraine d'Oak Ridges, au nord de Toronto, et a obligé les autorités à imposer des restrictions au développement afin de protéger les zones de réalimentation en eau souterraine et en eau de surface.

L'étalement urbain dans des zones rurales anciennement desservies par des puits privés risque d'en-

traîner des problèmes de contamination de l'eau souterraine si les puits en question ne sont pas convenablement mis hors service (scellés). Les puits incorrectement abandonnés présentent une voie directe à la migration des contaminants urbains dans les aquifères.

Le développement urbain s'accompagne d'une augmentation des volumes de déchets municipaux et industriels qui sont d'ordinaire évacués dans les zones rurales. Les décharges abandonnées ou inconnues et les sites de stockage de déchets dangereux menacent la qualité des eaux souterraines pour tous les Canadiens, dans les villes comme en zones rurales. On risque par exemple d'installer des puits privés ou municipaux près de sites inconnus d'élimination des déchets. Les municipalités se débarrassent de volumes grandissants de biosolides en recourant à l'épandage sur des terres agricoles, ce qui entraîne une dégradation des eaux souterraines et des eaux de surface. De plus, l'étalement urbain empiète également sur des zones actuellement ou anciennement utilisées pour l'évacuation des déchets, ce qui pose une menace supplémentaire pour la qualité des approvisionnements en eau.

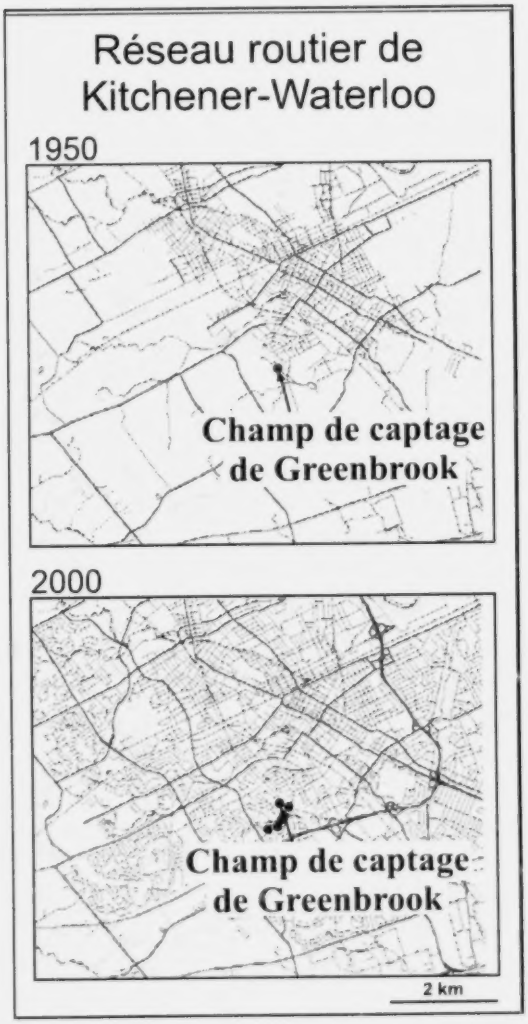

Fig. 4 Exemple d'un champ de captage municipal (champ de captage de Greenbrook, Kitchener-Waterloo, Ontario) situé à l'origine en zone rurale mais qui se retrouve aujourd'hui au milieu d'une zone urbaine (Bester et al., 2002).

Même la croissance des petits villages dépourvus de systèmes de traitement municipaux ou de systèmes d'épuration des eaux usées risque d'influer sur la qualité des eaux souterraines. Les habitations de ces villages sont dotées de leurs propres systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées. À mesures que les villages grandissent, le nombre de ces systèmes individuels augmente. Ainsi, on pompe des volumes grandissants d'eau souterraine dans des zones qui subissent par ailleurs les effets d'une multiplication des fosses septiques.

Protection des sources

Les pratiques historiques et actuelles d'utilisation des terres ont eu un impact sur la qualité des eaux souterraines en zones urbaines. Les municipalités qui dépendent des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau potable ont pratiquement toutes opté pour le traitement de l'eau souterraine à la tête de puits dont elles dépendent désormais

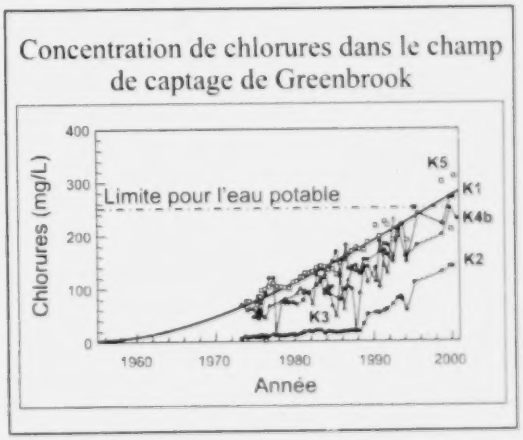

Fig. 5 Incidence d'une contamination à long terme par le sel de voirie sur la qualité des eaux souterraines dans un champ de captage municipal (champ de captage de Greenbrook, Kitchener-Waterloo, Ontario) (Bester et al., 2002).

totalement. Cette solution ne procure aucune protection contre les contaminants inconnus, qui ne font pas l'objet des test de dépistage réguliers, ou que les systèmes de traitement sont incapables d'éliminer.

La protection des sources doit devenir un élément essentiel des stratégies de gestion à long terme de l'eau souterraine tant pour les résidents des villes que pour ceux des zones rurales. Les stratégies de gestion qui conjuguent la protection des têtes de puits et la modification des pratiques d'utilisation des terres ont donné des résultats probants en matière de protection de la qualité des eaux souterraines. Comme la protection des sources doit s'accompagner de restrictions en matière d'utilisation des terres, elle pose un dilemme pour les municipalités puisqu'elle limite le développement économique.

Programme de protection des champs de captage du Nouveau-Brunswick

Le Nouveau-Brunswick a mis en place un excellent programme de protection des champs de captage qui s'est même mérité un prix international. Pour atteindre ses objectifs, ce programme intègre la gestion du bassin hydrographique et la coordination des connaissances scientifiques, de la planification, de l'évaluation, des programmes d'information du public et des mesures de mise en œuvre. On a mis en place toute une gamme de réseaux de surveillance pour faciliter l'évaluation et la planification (eaux souterraines, cours d'eau, qualité de l'air, eaux usées, effets environnementaux, etc.). On a récemment recruté des hydrogéologues dans diverses régions afin de mettre en œuvre les mesures prévues de protection des eaux souterraines.

La province a mis en œuvre ou mettra en œuvre d'ici à 2008 de tels programmes pour l'ensemble de ses 56 champs de captage, desservant 20 % de la population, dans le cadre du « Décret de désignation du secteur protégé du champ de captage du Nouveau-Brunswick ». La surveillance vises diverses activités conduites à l'intérieur d'un secteur protégé subdivisé pour les besoins de la cause en trois zones englobant un puits ou un champ d'alimentation donné. On tient ainsi compte du fait que divers contaminants peuvent persister, être transportés et poser des risques différents.

La zone A, celle où les risques de pollution sont les plus élevés, se trouve la plus près du puits. Elle est délimitée en fonction d'un temps de parcours de l'eau souterraine de 250 jours dans les aquifères du substratum rocheux, et de 100 jours dans les aquifères de sable et de gravier. Cette zone fait l'objet de la surveillance la plus étroite de toute une gamme de facteurs (fosses septiques, conduites d'égouts, fumier, produits pétroliers, solvants chlorés, pesticides, etc.). La zone B, où les risques de pollutions sont jugés moyens, entoure la zone A et est délimitée par un temps de parcours de l'eau souterraine de 250 jours à 5 ans. Même si le risque de contamination bactérienne y est grandement réduit, d'autres contaminants comme les produits pétroliers, les solvants chlorés, etc. posent une menace pour la ressource. La zone C, où les risques de pollution sont jugés faibles, entoure les zones A et B et est délimitée en fonction d'un temps de parcours de l'eau souterraine de 5 à 25 ans. On y applique des mesures de surveillance des substances chimiques et d'autres polluants comme les solvants chlorés et les produits pétroliers, mais ces mesures sont moins rigoureuses. Par exemple, on y autorise l'entreposage de quantités de produits pétroliers atteignant jusqu'à 2 000 litres.

Le décret prévoit certaines exemptions. Par exemple, les petites installations d'entreposage de produits pétroliers des domiciles privés sont autorisées. Les sources existantes sont exemptées, mais on prévoit qu'elles seront graduellement supprimées. Par exemple, les sites pétroliers situés dans la zone A seront démantelés dans les 10 ans, et ceux situés dans la zone B disparaîtront dans les 25 ans. Les installations de nettoyage à sec seront éliminées au cours des 3, 5 et 7 prochaines années dans les zones A, B et C respectivement.

Les puits privés (40 % de la population) sont également protégés par la réglementation ayant trait à l'eau potable et par celle ayant trait aux puits. Tous les nouveaux puits font l'objet d'échantillonnages de contrôle de la qualité. Ils sont tous enregistrés dans un système de gestion des données.

État des connaissances

Des études donnent à conclure que le niveau de contamination des eaux souterraines au Canada est comparable à celui que l'on observe dans d'autres pays (Europe, États-Unis et beaucoup de pays en développement). Le développement urbain au Canada envahit rapidement des zones traditionnellement rurales ou agricoles. Pour les municipalités dont l'approvisionnement en eau potable dépend des réserves d'eaux souterraines, l'étalement urbain dans les zones où se trouvent leurs champs de captage menace la qualité des eaux souterraines à cause des nouvelles sources de contaminants urbains qui l'accompagnent (sel de voirie, industrie, etc. La solution consiste soit à opter pour un nouveau et coûteux système d'adduction d'eau de surface pour puiser l'eau à même un lac ou une rivière (p. ex., Kitchener-

Waterloo envisage d'aménager un pipeline de plus de 80 kilomètres pour acheminer l'eau à partir du lac Érié), soit d'aménager un nouveau champ de captage plus loin, dans les régions rurales, qui sera toutefois exposé aux contaminants agricoles.

Les zones urbaines produisent des déchets qui sont d'ordinaire évacués dans les zones rurales (décharges municipales ou industrielles, sites d'élimination des déchets dangereux). Ces sites menacent les puits ruraux et les municipalités elles-mêmes, à mesure que les zones urbaines grandissent et que leurs champs de captage s'étendent. La production accrue de biosolides d'origine municipale risque également d'avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines. Si des puits incorrectement abandonnés se trouvent dans les zones où l'on pratique l'épandage de ces substances, ces puits risquent d'offrir une voie d'accès directe à la migration des contaminants de la surface aux aquifères.

Les activités agricoles risquent également d'avoir un impact sur l'approvisionnement en eau des municipalités. L'épandage de fumier ou la pulvérisation de pesticides sur les terres risquent de poser un problème sérieux si on les pratique à proximité d'un puits ou d'un champ de captage municipal mal conçu ou mal situé. Les volumes croissants de fumier produits par les entreprises d'élevage intensif du bétail ont eu une incidence sensible et bien documentée sur la qualité des eaux souterraines et des sources municipales d'approvisionnement en eau.

Les recherches conduites à l'échelle des bassins hydrographiques et les outils de modélisation perfectionnés ont amélioré l'évaluation des risques de contamination de l'eau souterraine dans les milieux tant urbains que ruraux. Nos connaissances accrues du transport et de la persistance de nombreuses espèces contaminantes critiques dans l'eau souterraine nous ont permis de mieux prédire le devenir de ces contaminants et leurs incidences possibles sur les sources d'eau souterraine, et de trouver des moyens de corriger le problème.

Il existe de nombreux cas documentés de puits mal construits ou mal entretenus qui sont ainsi devenus des voies de migration des contaminants. On soupçonne par ailleurs les puits incorrectement abandonnés de présenter une menace pour la qualité des eaux souterraines puisqu'ils permettent à l'eau de surface et de ruissellement contaminée d'atteindre les aquifères. Il existe probablement des centaines de milliers de puits abandonnés dans la seule province de l'Ontario, et la plupart de ces puits n'ont jamais été convenablement scellés.

Problèmes à élucider

On ne dispose pas encore de suffisamment de connaissances pour évaluer adéquatement l'importance des divers impacts s'exerçant sur la qualité de l'eau dans les milieux tant urbains que ruraux. De meilleures pratiques de gestion de l'utilisation des terres et de zonage permettront de réduire les menaces qui pèsent sur la qualité des eaux souterraines. Des recherches plus approfondies sont toutefois requises pour délimiter précisément les zones qui ont besoin d'être protégées. Nous avons en outre besoin de techniques et de modèles d'évaluation plus performants pour évaluer les pratiques intégrées d'utilisation de l'eau souterraine, de l'eau de surface et des terres à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques.

Nous savons déjà que les puits mal construits sont des voies d'entrée pour les contaminants, mais nous ignorons toujours l'ampleur exacte du problème. Même si nous soupçonnons de manière générale les puits incorrectement abandonnés de permettre aux contaminants d'atteindre les aquifères, nous possédons peu de preuves scientifiques qui permettraient de confirmer ou d'infirmer ces soupçons et, à plus forte raison, d'évaluer l'ampleur de la menace que font peser sur l'eau souterraine les nombreux puits incorrectement abandonnés au Canada. Notre ignorance de l'emplacement exact de la plupart de ces puits vient encore compliquer le problème. En règle générale, au Canada, les puits sont enregistrés au moment du forage, mais pas au moment de leur mise hors service. Les puits peu profonds abandonnés, qui ne sont généralement pas enregistrés, présentent un risque. Nous n'en entendrons probablement parler qu'à partir du moment où ils poseront un risque de contamination des eaux souterraine ou un risque pour la santé humaine.

Perspectives politiques

À mesure que les zones urbaines empiéteront sur des zones traditionnellement rurales, la menace que posent les sources urbaines de contamination des eaux souterraines pèsera de plus en plus sur les résidents des villes et des zones rurales qui dépendent de cette ressource pour leur approvisionnement en eau potable. Les pratiques d'utilisation des terres et les règlements y afférents doivent être adaptés pour prendre en compte l'ensemble des activités urbaines, rurales et agricoles, avec la participation active du public, des intervenants, des scientifiques et des organismes gouvernementaux. Pour être efficaces, toutes ces pratiques, y compris 1) l'aménagement de zones de protection des têtes de puits, 2) la protec-

tion des sources (bassins de réalimentation), 3) l'application de meilleures pratiques de gestion et 4) l'application de règlements de zonage, doivent être adoptées à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques. De plus, la gestion à long terme des eaux souterraines doit prendre en compte l'évolution des pratiques d'utilisation des terres et des besoins en eau dans les milieux ruraux et urbains. La mise en œuvre de telles pratiques nécessitera peut-être un changement majeur de la philosophie des administrations locales en matière de développement. La protection des champs de captage et des aires de réalimentation doit désormais prendre le pas sur la mise en valeur économique des terres.

Le choix de l'emplacement des puits, leur forage et surtout leur mise hors service devraient faire l'objet de règles claires et d'inspections.

Références

Bester, M. 2002. *Numerical Simulation of Road Salt Impact at the Greenbrook Well Field, Kitchener, Ontario*. Thèse de maîtrise, Département des sciences de la terre, University of Waterloo, Waterloo (Ontario), Canada.

Howard, K.W.F. 1997. Impacts of urban development on groundwater, dans : N. Eyles (éd.), *Environmental Geology of Urban Areas*. Publication spéciale de l'Association géologique du Canada, GEOtext #3, p. 93-104.

Programme de protection des champs de captage du Nouveau-Brunswick : http://www.gnb.ca/0009/0371/0001/index.html

2.8 Industrie minière et métallurgie

Contexte général

L'extraction des métaux a toujours fait partie des principales industries primaires du Canada. On trouve des mines souterraines ou des mines à ciel ouvert dans toutes les provinces et les territoires du Canada (sauf l'Île du Prince-Édouard). Il existe à l'heure actuelle plus de 90 mines de métaux en exploitation. Leur nombre a eu tendance à rester le même au cours de la dernière décennie, mais elles sont devenues plus grandes et plus polluantes.

L'industrie de l'extraction et de la transformation des métaux produit des volumes considérables de déchets. Il s'agit principalement de déchets de roche produits pendant l'extraction et de résidus miniers produits à l'étape de la transformation du minerai. Les opérations de fusion et de finition produisent des volumes moins considérables de déchets. On estime que les activités minières ont produit au Canada environ 350 millions de tonnes de déchets de roche, 510 millions de tonnes de résidus miniers sulfurés et 55 millions de tonnes d'autres déchets. Les contaminants des sites miniers qui aboutissent dans l'eau souterraine comprennent en général des métaux, des sulfates et des acides. Les principaux métaux sont le fer (p. ex., mine Nickel Rim, Ontario), le nickel (p. ex., mine de Lynn Lake, Manitoba), le cuivre et le zinc (p. ex., mine Sherridan, Manitoba) et l'arsenic (p. ex., mine Giant, Territoires du Nord-Ouest).

Questions principales

Il existe probablement au Canada plus de 10 000 mines abandonnées. En Ontario seulement, on estime qu'il en existe plus de 6 000. Les déchets de roche et les résidus miniers de ces sites peuvent rejeter dans l'eau souterraine d'importantes quantités de sulfates, de métaux et d'acides. Les sites de stockage des déchets qui ne sont pas protégés contre l'oxydation et les rejets de métaux peuvent devenir des sources importantes de contamination des eaux souterraines et des écosystèmes aquatiques qui risquent de persister pendant des centaines à des milliers d'années.

Contamination causée par l'extraction des métaux

L'extraction minière engendre des volumes considérables de déchets de roche que l'on empile sur des superficies pouvant atteindre des centaines d'hectares. Ces déchets présentent une granulométrie grossière, et leur conductivité hydraulique est donc élevée. Ils permettent une infiltration rapide de l'eau des précipitations et de l'oxygène. Les déchets de roche des mines de métaux contiennent normalement des minéraux sulfurés, à des concentrations qui restent toutefois généralement assez faibles (moins de 0,1 % de soufre en poids). La circulation de l'eau et de l'oxygène dans les déchets de roche engendre l'oxydation des minéraux sulfurés (p. ex., la pyrite), produisant de fortes concentrations de sulfates et de fer dissous dans l'eau souterraine ainsi que de l'eau acide. L'eau des précipitations qui s'écoule vers le bas à travers les déchets de roche jusqu'à la nappe phréatique transporte avec elle les sulfates et les métaux dissous ainsi que l'acidité qui sont ensuite entraînés loin du site par l'écoulement des eaux souterraines. Les eaux souterraines ainsi contaminées aboutissent souvent dans les lacs, les cours d'eau et les terres humides, provoquant ainsi de graves problèmes de drainage acide. Des études réalisées en conditions réelles, en laboratoire et à l'aide de modèles ont donné à conclure que le processus d'oxydation peut se poursuivre pendant des centaines d'années. Ainsi, la contamination des eaux souterraines et des eaux de surface peut persister longtemps après la fermeture d'une mine et l'abandon du site. Les concentrations

de fer et de sulfates peuvent atteindre des niveaux très élevés. Par exemple, au site de Iron Mountain, aux États-Unis, on a mesuré des concentrations de fer et de sulfates atteignant 86 000 et 760 000 mg/L respectivement (à titre de comparaison, les concentrations maximales de fer et de sulfates fixées par les RQEPC sont de 0,3 et de 500 mg/L respectivement). L'eau contaminée peut en outre devenir très acide; on a mesuré des valeurs du pH inférieures à 2 sur le site de Iron Mountain.

Les résidus miniers sont évacués à l'aide d'un dispositif hydraulique dans une dépression naturelle ou dans un bassin de retenue artificiel fermé par une digue ou un barrage. Ils peuvent atteindre des volumes considérables, certains bassins finissant par couvrir des centaines d'hectares. Ces résidus présentent en général une granulométrie fine et une conductivité hydraulique faible à modérée, ainsi qu'une teneur en sulfures modérée à élevée. Par exemple, les résidus miniers de la mine Nickel Rim, à Sudbury (Ontario) présentent une teneur en soufre de 5 % en poids. Les réactions d'oxydation qui se produisent dans les résidus miniers comportent deux étapes. Dans la zone non saturée au-dessus de la nappe phréatique, les précipitations et l'oxygène s'infiltrent vers le bas et provoquent l'oxydation des minéraux sulfurés (p. ex., la pyrite) pour produire des sulfates et des métaux dissous, et augmentent l'acidité de l'eau. Les métaux dissous (p. ex., le fer ferreux) subissent eux aussi une oxydation et précipitent pour donner de l'hydroxyde métallique, retirant ainsi de l'eau les métaux dissous. Toutefois, cette réaction augmente l'acidité de l'eau. L'eau acide dissout les carbonates, les hydroxydes et les aluminosilicates, ce qui entraîne une baisse de l'acidité de l'eau et la précipitation d'une partie des métaux.

État des connaissances

Nous connaissons assez bien les processus qui conduisent aux rejets de métaux dans l'eau souterraine et à la génération d'eaux souterraines acides au sein des déchets miniers. Ces déchets (déchets de roche et résidus miniers) risquent dans certains site d'engendrer dans les eaux souterraines des concentrations de métaux dissous (fer, cuivre, arsenic, etc.) et de sulfates de très loin supérieures aux RQEPC, et de rendre l'eau souterraine très acide. Étant donné la lenteur du phénomène d'oxydation et de l'écoulement de l'eau souterraine, ces sources de contamination peuvent persister pour des dizaines à des centaines d'années, et même, dans certains cas extrêmes, pour des milliers d'années. Les contaminants peuvent être transportés par l'eau souterraine à des centaines de mètres du site minier. Ils sont en général rejetés dans l'eau de surface (cours d'eau, lacs et terres humides), provoquant une dégradation extrêmement durable de l'environnement.

Les facteurs géotechniques priment souvent sur la qualité des eaux souterraines lorsqu'il s'agit de concevoir les sites d'évacuation de déchets miniers. Il convient donc d'aménager autour des déchets de roche accumulés des barrières qui empêcheront les contaminants d'atteindre l'eau souterraine. Les effluents provenant de ces sites et dont les concentrations de contaminants dépassent les normes de qualité de l'eau doivent être récupérés et traités.

La méthode classique qui consiste à faire pousser des végétaux sur les amoncellements de résidus miniers n'empêche pas l'oxydation des sulfates et ne réduit donc pas les rejets de métaux et d'acides dans l'eau souterraine. Il convient donc d'installer sur les résidus des barrières qui bloqueront la pénétration de l'oxygène peu après leur dépôt pour empêcher les réaction d'oxydation. De 10 à 15 ans environ après le dépôt des résidus, il conviendrait d'installer des systèmes de traitement de l'eau qui pénètre dans ces résidus et qui les traverse, compte tenu de sa haute teneur en sulfates et en métaux ainsi que de sa haute acidité.

Problèmes à élucider

Nous connaissons déjà très bien les processus qui mènent à la production de fortes concentrations de métaux et d'acides dans l'eau souterraine exposée aux déchets miniers, mais nous comprenons beaucoup moins bien les processus qui neutralisent l'acide et qui empêchent (réduisent) les rejets de métaux dans les eaux souterraines. Nous avons besoin de technologies efficaces en termes de coûts qui permettront d'empêcher l'oxydation et le rejet de métaux et d'acides dans l'eau souterraine. Nous connaissons mieux les mécanismes d'écoulement de l'eau dans les résidus miniers et la géochimie de ces résidus que les mécanismes d'écoulement de l'eau dans les déchets de roche et les déchets métallurgiques.

Il existe déjà des méthodes de traitement dont certaines font appel à la collecte et au traitement classiques de l'eau contaminée. Toutefois, ces méthodes sont coûteuses et sont peut-être inefficaces. De nouvelles technologies innovatrices sont en cours d'élaboration et d'évaluation, comme les systèmes de traitement passif in situ (parois drainantes). Des efforts supplémentaires seront requis pour mettre au point des techniques rentables de traitement des effluents de déchets miniers, y compris par la neutralisation des milieux acides.

Des tests réalisés en laboratoire nous donnent un aperçu des processus qui interviennent dans un site d'évacuation des déchets et peuvent nous servir à prédire les quantités de contaminants incorporées dans l'eau souterraine. Toutefois, comme il n'existe aucune méthode largement reconnue de mise à l'échelle de ces tests, il est difficile d'en tirer des conclusions valables sur le comportement des contaminants en conditions réelles. Par ailleurs, nous avons besoin de modèles de prévision à long terme des rejets de contaminants pour mieux mesurer les problèmes de contamination sur les sites miniers et évaluer de possibles technologies de restauration.

Nous connaissons en général très mal les problèmes actuels ou potentiels de qualité des eaux souterraines qui se posent dans les sites miniers abandonnés au Canada. Nous avons besoin d'évaluer ces sites, mais les efforts consacrés à ce travail varient d'une province à l'autre. En Ontario, 50 % des 6 015 sites abandonnés ont été inspectés, mais moins de 1 % d'entre eux ont jusqu'à présent fait l'objet d'essais de stabilité physique ou chimique, et moins de 5 % font actuellement l'objet de travaux de restauration. Au Québec, les 1 000 sites abandonnés ont été inspectés, et des tests de stabilité ont été réalisés dans la plupart des cas. Des travaux de restauration sont en cours sur 95 sites. La Colombie-Britannique, qui possède peu de mines abandonnées (la plupart sont toujours en exploitation), travaille actuellement à l'élaboration d'une base de données sur ses mines actives et abandonnées.

Perspectives politiques

Les autorités fédérales ont récemment adopté un règlement visant à limiter les rejets d'effluents contaminés provenant des mines actives dans les eaux de surface. Par ailleurs, certaines lignes directrices provinciales ayant trait aux déchets engendrés par les mines actives ont récemment été révisées, ce qui devrait assurer une meilleure protection de la qualité des eaux souterraines. Les autres instances devraient également revoir leurs lignes directrices pour veiller à mieux protéger la qualité des eaux souterraines. La construction de puits de contrôle permettant de détecter les problèmes de qualité des eaux souterraines devrait faire partie intégrante des directives et des stratégies de gestion des déchets des sites miniers actifs. Nous avons également besoin de lignes directrices pour les mines abandonnées, et notamment pour le choix des techniques appropriées de décontamination de l'eau souterraine.

Étant donné le nombre considérable de sites miniers actifs ou abandonnés au Canada et les énormes volumes de déchets miniers présents à chacun de ces sites, les travaux de restauration risquent de coûter très cher. On s'attend à devoir dépenser entre 3 et 5 milliards de dollars uniquement pour la remise en état des sites miniers actifs au Canada. On ignore par ailleurs quel pourrait être le coût de la restauration de l'ensemble des sites abandonnés, mais on estime que les travaux de restauration en cours sur certains sites miniers abandonnés pourraient atteindre jusqu'à 200 millions de dollars par site. Il est recommandé que pendant la période d'exploitation, les autorités exigent des sociétés minières qu'elles créent un dépôt de garantie qui servira plus tard à couvrir les coûts de la mise hors service de la mine et de correction des problèmes qui pourraient se poser à long terme après l'abandon du site. À l'heure actuelle, ce type de garantie varie selon la société et l'ordre de gouvernement. Les coûts de mise hors service de la mine Falconbridge, en Ontario, sont estimés à 175 millions de dollars, et la société a mis de côté une somme de 100 millions à cette fin. Par contre, lorsque la mine Giant, dans les Territoires du Nord-Ouest, a mis un terme à ses opérations en 1999, la caution prévue pour couvrir les coûts de fermeture n'était que de 500 000 dollars.

Il existe des programmes internationaux qui portent sur le développement d'approches de prévision unifiées pour les déchets miniers et les déchets de roche et qui bénéficient du soutien de l'International Network on Acid Rock Drainage Prevention (INAP), un forum de recherche parrainé par l'industrie. De tels programmes permettent de mettre en commun les connaissances de l'industrie et des chercheurs. Ils devraient bénéficier de l'appui et de la collaboration des organismes gouvernementaux qui pourraient tirer profit des connaissances acquises lorsqu'ils envisagent de modifier les normes ou d'en édicter de nouvelles. Il convient de revoir les lignes directrices actuelles afin d'évaluer le bien-fondé des approches recommandées.

Références

Blowes, D.W., C.J. Ptacek, K.R. Waybrant et J.G. Bain. 1995. In situ treatment of mine drainage water using porous reactive walls. dans: L. Lortie, W.D. Gould et S. Rajan (éds), *Proceedings of the Eleventh Annual General Meeting of Biominet, Biotechnology and the Mining Environment*, Ottawa (Ontario). p. 119-128.

Benner, S.G., D.W. Blowes, W.D. Gould, R.B. Herbert Jr. et C.J. Ptacek. 1999. A new approach to treatment of acid mine drainage. *Environmental Science and Technology* 33(16):2793-2799.

Blowes, D.W., J.A. Cherry et E.J. Reardon. 1987. The hydrogeochemistry of four inactive tailings impoundments.

Proceedings of the 1987 *National Symposium on Mining, Hydrology, Sedimentology, and Reclamation*, p. 253-261.

Williams, D.J. 2003. Addressing the expectations for mine site rehabilitation of stakeholders of the mineral industry? An Australian perspective. *Geotechnical News*, 21(1):38-43.

2.9 Déversements : LNAL et LNAD

Contexte général

Les déversements chimiques sont fréquemment constitués de substances organiques qui ne se dissolvent pas facilement dans l'eau (aussi connues sous le nom de liquides non aqueux, ou LNA). La contamination des eaux souterraines par cette classe de produits chimiques suscite des préoccupations dans le monde entier étant donné que ces produits sont très largement utilisés et produits dans le monde et qu'ils posent un risque sérieux pour la santé des humains à de très faibles concentrations (de l'ordre des parties par milliard). On trouve des LNA dans l'essence (benzène, toluène, xylène), les transformateurs électriques (PCB), les produits de préservation du bois (créosote), les dégraissants industriels (tétrachloroéthylène (PCE), tétrachlorure de carbone), les produits de nettoyage à sec (trichloroéthylène (TCE)), les produits de teinture (chlorobenzène) et les substances chimiques intermédiaires utilisées pour la fabrication d'autres substances (polychlorure de vinyle (PVC)).

Il existe un peu partout au Canada de nombreux sites où de tels déversements ont contaminé l'eau souterraine. La plupart des lieux contaminés sont très petits (p. ex., stations-service ou établissements de nettoyage à sec); d'autres sont plus grands (raffineries de pétrole, usines chimiques, installations de préservation du bois, installations d'élimination des déchets et sites industriels). Certains de ces endroits — par exemple, le site de False Creek, à Vancouver, le site d'évacuation des déchets de Ville Mercier, au Québec, l'ancien site de la CWML à Smithville (Ontario) et les sites de la Sydney Coke Oven and Tar Ponds de Sydney (Nouvelle-Écosse) — contiennent des eaux souterraines gravement contaminées qui ont perturbé l'approvisionnement en eau de beaucoup de gens, attirant ainsi l'attention du public et des médias de partout au Canada.

Questions principales

Les LNA menacent les eaux souterraines pour diverses raisons. Premièrement, à partir du moment où ils se retrouvent sous la surface du sol, ils deviennent très difficiles à extraire. En effet, les LNAD, plus denses que l'eau, peuvent migrer à de très grandes profondeurs dans le sol. Par ailleurs, ces liquides qui forment dans l'eau une phase distincte de la phase aqueuse, sont quand même assez solubles pour atteindre dans l'eau souterraine des concentrations qui dépassent de plusieurs ordres de grandeur les seuils recommandés pour la qualité de l'eau. Ainsi, un panache de polluants dissous pourra être entraîné avec l'écoulement de l'eau souterraine. Le taux de dissolution des LNA dans l'eau est en général très faible, et ces substances peuvent donc persister sous la surface du sol pendant très longtemps. L'eau souterraine exposée à ces substances peut atteindre des concentrations très supérieures aux RQEPC.

LNA

Les LNA se divisent en deux catégories : 1) les LNAL (liquides non aqueux légers), plus légers que l'eau, comme l'essence, et 2) les LNAD (liquides non aqueux denses), plus lourds que l'eau, comme les solvants chlorés. Le comportement de ces deux types de LNA sous la surface du sol peu varier passablement. Lorsqu'un LNAL est déversé à la surface du sol, il migre vers le bas et, comme il est plus léger que l'eau, il s'arrête et s'accumule au-dessus de la nappe phréatique. De là, il se dissout lentement pour créer un panache d'eau souterraine contaminée qui a tendance à rester mince. Par contre, les LNAD s'infiltrent plus profondément dans l'aquifère et sont bloqués uniquement par des barrières à faible perméabilité comme l'argile ou le substratum rocheux. Les panaches d'eau souterraine contaminée peuvent être créés par la dissolution 1) des accumulations de LNAL qui se forment sur les couches de faible perméabilité ou 2) des LNAD résiduels qui persistent dans les pores et les fractures, à mesure que le polluant migre vers le bas à travers l'aquifère. Ainsi, la profondeur du panache de contaminant dissous variera en fonction de la profondeur de la source du LNAD.

Élimination des LNA

Étant donné les risques que fait peser sur la santé des humains la pollution de l'eau potable par les LNA, il est essentiel de protéger les eaux souterraines contre ces substances et de procéder à la décontamination des eaux souterraines polluées. La décontamination complète des sites contaminés par un déversement de LNA comporte plusieurs étapes. Premièrement, il convient d'établir des critères et des objectifs réalistes de décontamination (c'est-à-dire, pas « nous ferons de notre mieux », ni « nous éliminerons la totalité du polluant ») fondés sur une réduction adéquate du risque et qui serviront de point de départ à l'application de la technologie. Deuxièmement, si l'aquifère est contaminé par des LNA, il convient d'abord de localiser la

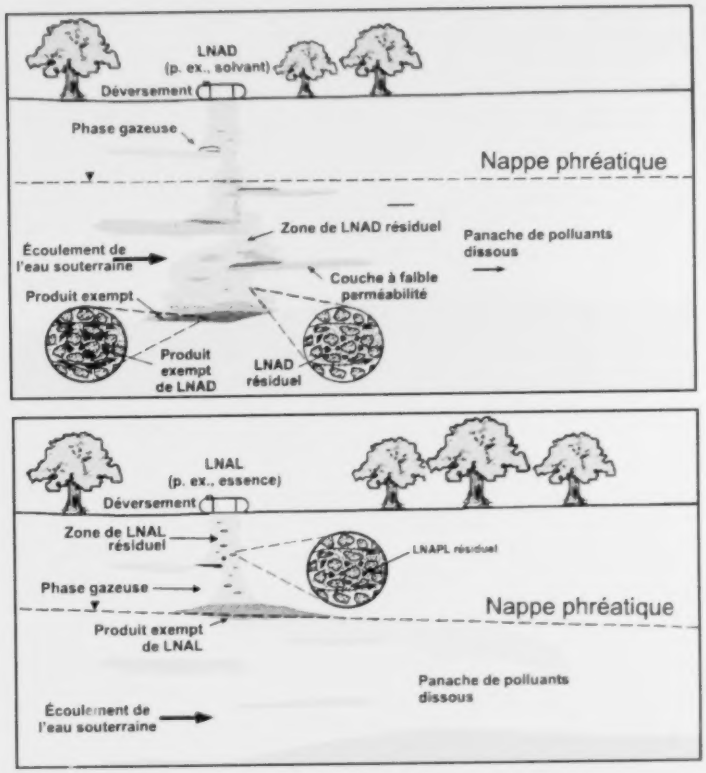

Fig. 6 Représentation schématique de la migration des LNAL et des LNAD dans les zones non saturées et saturées, et séparation en une phase gazeuse, un panache de contaminants dissous et des gouttelettes résiduelles dans les pores.

source de pollution. Cela fait, la source (par exemple, récipient qui fuit, sol contaminé, etc.) doit être enlevée ou confinée pour mettre un terme à la dissolution lente du LNA dans l'eau souterraine dont le panache pourrait autrement continuer de s'étendre pendant de nombreuses années. Troisièmement, il faut réaliser le degré voulu de décontamination du panache de polluants dissous. Enfin, il faut mettre en place un programme de contrôle continu à long terme pour s'assurer que l'aquifère a bien été décontaminé.

La décontamination des eaux souterraines polluées par les LNA (surtout les LNAD) est très difficile. Chacune de ses étapes présente des défis techniques qui peuvent empêcher ou limiter la remise en état des sites contaminés par ces substances. Par ailleurs, l'opération, lorsqu'elle est réalisable, peut souvent coûter des millions de dollars, et parfois même des centaines de millions.

Les techniques de lutte contre les panaches de polluants dissous en sont à divers stades de développement. Celles envisageables à l'heure actuelle sont :

1. *le pompage et le traitement :* pompage de l'eau souterraine contaminée de l'aquifère et transfert à une installation de traitement aux fins de décontamination;
2. *installations de barrières réactives perméables :* matériau conçu pour promouvoir la décomposition chimique ou biologique des LNA dissous, installé en tranchées pour intercepter le panache de polluants;
3. *atténuation naturelle :* grâce aux processus de dégradation, d'atténuation et de dissolution naturels, certains contaminants disparaissent rapidement de l'eau souterraine sans être transportés très loin.

La deuxième et la troisième de ces options n'en sont encore qu'à l'étape de l'élaboration.

Dans le cas des LNAL, comme la contamination n'a pas tendance à pénétrer profondément dans le sol, la décontamination de la source et du panache de polluants dissous constitue un objectif raisonnable. En outre, les techniques qui permettent une telle opéra-

tion sont très au point. S'agissant des LNAD, la décontamination complète de la source du contaminant et du panache de polluants dissous paraît encore difficile à réaliser dans la plupart des sites. Il est difficile, sinon impossible de localiser précisément les sources de LNAD puisque ces substances pénètrent profondément dans le sol et peuvent se propager dans un milieu souterrain hétérogène et fracturé. En conséquence, alors qu'il est souvent possible d'excaver les sols contaminés par les LNAL, une telle opération n'est pas envisageable pour les sites de contamination en profondeur par les LNAD. Par ailleurs, les recherches portant sur l'élimination des LNAD n'ont pas dépassé le stade préliminaire.

État des connaissances

Il est possible d'anticiper la présence de LNA en s'appuyant sur les antécédents d'utilisations de substances chimiques. Par exemple, on trouve d'ordinaire le trichloroéthylène (TCE) dans l'eau souterraine près des établissements de nettoyage à sec, et le benzène près des stations-service. Toutefois, dans beaucoup de cas, il est difficile de localiser précisément la source du LNA et il convient alors de procéder d'abord à une analyse et à la délimitation du panache de polluants dissous. Les LNAL sont plus faciles à trouver puisqu'ils flottent sur la nappe phréatique et ne pénètrent pas très profondément dans le sol. Par contre, les LNAD pénètrent profondément et sont plus difficiles à détecter. Que l'on connaisse ou non la source de la pollution, il importe surtout de savoir limiter l'extension du panache de polluants dissous. Il existe certaines techniques assez efficaces de lutte contre certains LNA dans certains milieux d'eaux souterraines (p. ex., pompage et traitement de l'eau contaminée par de l'essence dans un aquifère de sable).

Nous savons déjà que les concentrations de LNA dissous sont en général très faibles. Toutefois, comme les seuils prescrits dans les RQEPC pour la plupart de ces substances sont très faibles, des concentrations même très faibles de LNA dans l'eau souterraine peuvent présenter une menace pour la santé des humains si cette eau sert à la consommation humaine. Même si la source de LNA est très petite, sa dissolution très lente peut engendrer sur un vaste territoire des concentrations supérieures aux RQEPC qui persisteront pendant des années ou des décennies.

Problèmes à élucider

Nous ne possédons ni la technologie ni les méthodes pratiques qui permettraient de localiser précisément les LNA sous la surface du sol. Nous connaissons encore mal la mesure dans laquelle les LNAD sont capables de s'infiltrer dans un aquifère et comment l'hétérogénéité naturelle et les fractures influent sur la direction de leur déplacement et sur leur propagation. Les programmes de forage et d'échantillonnage ne permettent pas en règle générale de localiser les LNA en phase pure puisque ces substances peuvent être confinées dans un volume très limité, souvent inférieur à un mètre cube. S'agissant des LNAD, même si la source est localisée, il restera presque impossible de réussir une décontamination complète puisqu'il n'existe toujours pas de technique rentable et pratique de récupération ou de destruction in situ de ces substances.

De plus, nous ignorons souvent la composition des LNA déversés, ce qui complique la localisation du polluant et l'évaluation de l'efficacité des moyens utilisés pour la décontamination. Par exemple, l'essence peut contenir des produits chimiques comme l'éther méthyltertiobutylique et le benzène qui présenteront des taux d'infiltration et de dégradation naturelle différents. Les méthodes efficaces d'élimination des composantes BTEX de l'essence sont sans effet sur l'éther méthyltertiobutylique.

Perspectives politiques

Les questions de réglementation et de remise en état entourant les LNAD doivent être traitées en priorité et progresser de front. La technologie pour récupérer ou détruire les LNAD progresse, mais sans qu'on sache clairement quels sont les objectifs de remise en état à atteindre. Malgré l'écart qui existe parfois entre l'état des connaissances scientifiques et leur application dans la mise en œuvre des règlements et des politiques, il existe de nombreux domaines où les chercheurs et les responsables de la réglementation et des politiques se posent les mêmes questions : Combien de LNAD doit-on récupérer et détruire? Faut-il les éliminer à 100 %, ou un taux de 90 % suffira-t-il? Si nous sommes incapables de trouver la source, devrions-nous dépenser des sommes considérables pour chercher à remettre l'aquifère en état? Comment les responsables des politiques et de la réglementation feront-ils l'arbitrage entre les coûts, les engagements à long terme, et les risques possibles ou l'absence de risque pour la santé des humains? (p. ex., si on parvient, dans un site donné, à éliminer tous les contaminants, réussira-t-on à convaincre les gens de boire cette eau?)

Une approche intéressante pour sensibiliser les décideurs aux aspects scientifiques de ces questions et à l'état des technologies consisterait à démontrer les méthodes correctives, les bilans, les coûts et le rôle des politiques dans quelques sites contrôlés,

comme les bases des Forces canadiennes de Borden et de Smithville, en Ontario. Les responsables des politiques devraient participer à la validation et à la démonstration des technologies émergentes d'élimination des LNA.

Au cours des années 80, l'industrie pétrolière a réussi à former un partenariat entre, d'une part, les responsables de la réglementation, les décideurs et les représentants de l'industrie et, d'autre part, les chercheurs pour évaluer et démontrer les processus de contamination de l'eau souterraine et les technologies de remise en état. Ces recherches et ces démonstrations étaient conduites en conditions réelles et procuraient un environnement ciblé et réaliste pour un échange significatif de connaissances. Une recommandation importante consisterait à raviver ce partenariat dans le cas des LNAL et de créer ce type de partenariat pour les LNAD.

Les responsables de la réglementation et des politiques doivent à la fois être conscients des limites techniques des opérations de décontamination des sites et des coûts potentiellement énormes de la détection des contaminants, de la remise en état des sites et de leur surveillance. À titre d'exemple, le coût des efforts de décontamination à Ville Mercier (Québec), Sydney (Nouvelle-Écosse) et Smithville (Ontario) pourrait varier à chaque endroit entre 30 et 700 millions de dollars. Dans certains cas, il pourrait s'avérer impossible de trouver la source du LNA, en particulier si cette source est très circonscrite, ce qui signifierait que malgré les millions dépensés, le site pourrait ne jamais être complètement remis en état. Les spécialistes des eaux souterraines sont souvent en mesure de localiser les lieux exposés aux déversements, mais compte tenu des règles en vigueur, le pollueur n'est pas tenu de prendre en charge les coûts de la décontamination. Les organismes de réglementation ont raison de mettre l'accent sur la planification et la prévention de la pollution, mais il serait également utile de pouvoir compter sur des politiques obligeant les responsables de la contamination des eaux souterraines à assumer la responsabilité des efforts de décontamination.

Références

National Research Council. 2000. *Natural Attenuation for Groundwater Remediation*. National Academy Press, Washington, D.C.

Pankow, J.F. and J.A. Cherry. 1996. *Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater*. Waterloo Press, Waterloo Educational Services, 2 Taggart Court, Unit 4. Guelph, Ontario, Canada, N1H 6H8.

Jackson, R.E. 2001. Field innovation forum: DNAPL remediation: which "new paradigm" will prevail? *Ground Water Monitoring & Remediation*, 21(3):54-58.

U.S. EPA. 1997. *Expedited Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: a Guide for Regulators*. EPA 510-B-97-001.

2.10 Problèmes propres à l'industrie pétrolière

Contexte général

C'est à Petrolia, dans le sud-ouest de l'Ontario, qu'on a pour la première fois découvert du pétrole au Canada, mais c'est la découverte historique du gisement de Leduc (Alberta), à la fin des années 40, qui a marqué le point de départ de l'industrie pétrolière canadienne moderne. La production canadienne classique de pétrole et de gaz est principalement concentrée en Alberta, dans le sud de la Saskatchewan et dans le nord-est de la Colombie-Britannique. Il existe également des gisements moins importants au Manitoba, en Ontario et dans les Territoires du Nord-Ouest.

L'exploitation des ressources pétrolière comporte diverses étapes, de l'exploration à la production pétrochimique, qui risquent d'influer sur la qualité des eaux souterraines. Les forages d'exploration et les puits de production de pétrole et de gaz traversent des aquifères qui servent souvent de sources d'eau potable aux résidents des régions rurales et aux municipalités, ainsi qu'à l'irrigation des terres et à l'abreuvement des animaux. Le forage et la transformation du pétrole produisent des déchets liquides. Les pipelines qui transportent le pétrole et le gaz des puits de production aux installations d'entreposage, aux raffineries et aux usines pétrochimiques sont enfouis au-dessus des sources rurales d'eaux souterraines. Les contaminants produits par l'industrie pétrolière et qui menacent la qualité des eaux souterraines se répartissent en quatre catégories :

1. *hydrocarbures* provenant des forages, des déversements, des bris de conduites, des fuites de réservoirs, des fosses de brûlage et des éruptions;
2. *eaux salines* provenant des puisards, des déversements et des fuites de pipelines;
3. *métaux* provenant de l'eau de formation et des fosses de brûlage;
4. *matières radioactives naturelles* présentes à faibles concentrations dans le pétrole mais qui peuvent se concentrer dans le tartre des conduites.

L'industrie pétrolière est aujourd'hui de plus en plus sensible au problème de la contamination des eaux souterraines et utilise des techniques et des procédures plus efficaces pour l'éviter, mais le risque persiste, même s'il est en général limité et localisé.

Questions principales

C'est le produit de plus d'un siècle 1) d'exploration, de mise en valeur et de raffinage (trous de forage, bassins à boue, fosses de brûlage et sites de déversements abandonnés), 2) d'application de normes environnementales moins strictes ainsi que 3) du vieillissement des installations (dispositifs d'étanchéité, bouchons, tubages, pompes, pipelines et cuves de stockage utilisés pour les opérations de production et d'élimination) qui représente aujourd'hui la menace la plus sérieuse de l'industrie pétrolière pour la qualité des eaux souterraines. Tous ces facteurs peuvent provoquer la contamination de l'eau souterraine.

Activités du passé

Les puits de pétrole et de gaz et les trous de forage abandonnés risquent de servir de voies de transfert — pour le pétrole, le gaz et l'eau salée — des profondeurs aux aquifères situés près de la surface. Considérés individuellement, ils constituent des sources ponctuelles de contamination très circonscrites, mais les régions de production canadiennes en recèlent des nombres considérables. On estime en effet qu'il existe dans la seule province de l'Alberta plus de 600 000 puits de pétrole et de gaz abandonnés. Au moment de leur mise hors service, les puits sont scellés à l'aide d'un bouchon de béton coulé près de la base du cuvelage pour empêcher la migration vers le haut de fluides contaminants. Ces puits sont par ailleurs faits de tubages en acier qui empêchent les fluides de formation d'y pénétrer. Si le bouchon de béton et les tubages en acier restent intacts, les risques de contamination des aquifères peu profonds resteront limités. Par contre, même si ces puits étaient mis hors service dans le respect des règles en vigueur et conformément aux techniques actuelles, on aurait des motifs de s'inquiéter de la durabilité à long terme des dispositifs d'étanchéité et des bouchons en béton, et de la résistance des tubages à la corrosion, notamment du fait qu'il existe de nombreux puits abandonnés depuis plus de 50 ans.

La production pétrolière et gazière engendre normalement la production d'eau salée qui doit être renvoyée dans les formations souterraines de production ou plus profondément encore par des puits de refoulement. La salinité de cette eau risque d'être plusieurs fois supérieure à celle de l'eau de mer. Le raffinage et l'industrie pétrochimique produisent par ailleurs des déchets liquides dangereux dont on se débarrasse souvent en les injectant dans les puits profonds. Comme les formations dans lesquelles l'eau salée et les déchets liquides sont évacués sont d'anciennes formations de production de pétrole ou de gaz, nous savons qu'elles sont restées isolées des formations sus-jacentes pendant des millions d'années. Cependant, les aquifères peu profonds risquent d'être contaminés en cas de corrosion des tubages des puits de refoulement, si l'espace ménagé entre les parois du trou de forage et le cuvelage n'est pas scellé, si la formation de stockage n'est pas assez profonde, ou si elle est reliée hydrauliquement aux aquifères. Les puits de refoulement utilisés en Alberta sont très profonds (plus de 600 m) et il n'existe aucun cas connu de remontée de liquides évacués. En Ontario, ces puits sont beaucoup moins profonds (moins de 300 m pour la plupart). La migration vers le haut de déchets liquides dans des puits de pétrole et d'eau souterraine incorrectement abandonnés combinée à la faible profondeur des puits de refoulement dans le comté de Lambton, en Ontario, a entraîné la contamination des aquifères peu profonds et de la rivière Sainte-Claire par des déchets de raffinage au cours des années 60 et 70.

Les déversements accidentels constituent une source plus fréquente de contamination des eaux souterraines peu profondes. Les fuites de pipelines constituent la source la plus commune de contamination par l'eau salée. Les déversements accidentels survenant pendant le transport, les bris de conduites, les fuites de réservoirs, les fosses de brûlage et les éruptions peuvent provoquer la contamination par les hydrocarbures. Ces accidents sont en général très localisés et limités à la surface; ils se prêtent donc aux techniques courantes de décontamination. Vu le nombre et l'âge de ces types d'impacts in situ, l'industrie et les pouvoirs publics ont adopté diverses méthodes fondées sur le risque pour prioriser les sites aux fins de la décontamination active, par opposition à passive, de l'eau souterraine. Le « Alberta Orphan Fund », un fonds d'affectation spéciale de 8 millions de dollars mis en place par l'industrie pour le financement de la décontamination des sites abandonnés, est un exemple de ce type d'approche.

Activités futures

La baisse des réserves pétrolières classiques et l'engouement pour le gaz naturel utilisé comme combustible propre dans les centrales électriques aux États-Unis ont poussé l'industrie pétrolière canadienne à se diversifier dans cinq nouvelles et grandes

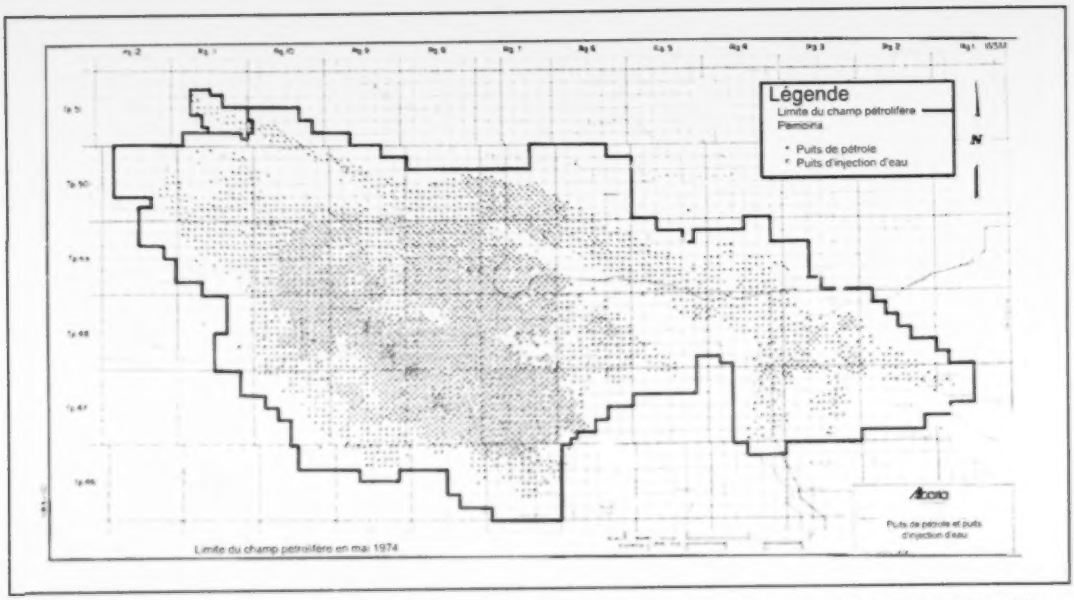

Fig. 7 Carte montrant le nombre et la densité des puits de pétrole et des puits d'injection d'eau, en 1976, dans le champ pétrolifère de Pembina (Alberta).

directions : 1) forages en mer au large de la côte est et éventuellement de la côte ouest; 2) gaz des contreforts des Rocheuses; 3) gaz de l'Arctique; 4) sables bitumineux; et 5) méthane des couches de houille.

Les activités actuelles de forage en mer se déroulent au large de la côte est (Hibernia, île de Sable) et de la côte ouest du Canada. Les activités d'exploration et de mise en valeur des ressources menées dans ces milieux n'ont aucun impact sur les eaux souterraines, sauf dans le cas des systèmes de transport qui acheminent le produit jusqu'aux raffineries. Des opérations de forage et de production se poursuivent dans le portion canadienne du lac Érié depuis les années 60. Malgré l'absence de cas de contamination importante des eaux souterraines, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) a interdit toute activité future de forage ou de production à partir des gisements américains. Il n'existe aucun projet semblable pour la portion canadienne du lac Érié.

Les activités d'exploration et les gazoducs des contreforts et de l'Arctique représentent de nouveaux défis pour la protection des eaux souterraines et la remise en état du milieu alpin, de la forêt boréale et de la toundra. On sait peu de choses de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants dans le pergélisol, mis à part le fait que ce milieu ne se comporte pas comme un milieu poreux ou fracturé. Nous avons besoin de recherches supplémentaires pour pouvoir appliquer des techniques et les technologies connues à ce type d'environnement. Enfin nos connaissances de base concernant l'écoulement et la géochimie de l'eau souterraine pour une grande partie des zones terrestres d'exploration pétrolière au Canada restent encore limitées.

L'exploitation des sables bitumineux dans le nord-est de l'Alberta est en pleine expansion. À l'heure actuelle, le quart de la production canadienne de pétrole provient des sables bitumineux et cette proportion devrait atteindre les 50 % d'ici à 2005. L'exploitation de ces sables entraîne la formation de grands puits et de bassins de résidus qui ont un impact sur la qualité de l'eau souterraine à l'échelle locale et régionale. Les opérations de récupération thermique in situ risquent de libérer des contaminants naturellement présents dans l'eau souterraine, comme l'arsenic. Nous avons absolument besoin d'une étude fondamentale de la qualité et de la variabilité géochimiques naturelles de l'eau souterraine. Les opérations in situ engendrent également la production d'eau salée. Les options d'élimination des déchets sont limitées car les sables bitumineux se trouvent généralement dans des milieux de forêt boréale qui ne tolèrent pas le sel. L'industrie et les responsables de la réglementation sont en train d'examiner et d'approuver des projets d'injection en puits profonds pour ces opérations. Il faudra entreprendre des recherches spécifiques aux sites, sur les

interactions entre les roches et l'eau dans les zones d'élimination en puits profonds. On observe des interactions entre un certain nombre de zones d'évacuation et l'eau de surface causées par l'écoulement de l'eau souterraine dans les cours d'eau. Il est urgent de procéder à une évaluation de la capacité dispersive de ces zones d'élimination et de leurs interactions avec l'eau de surface. Il en va de même pour le problème de la séquestration des gaz à effet de serre dans les aquifères profonds. Enfin, des recherches sont également requises pour déterminer l'impact environnemental cumulatif de ces méga-projets sur toutes les parties de l'écosystème, y compris l'eau souterraine.

Le méthane des gisements de houille fracturés est extrait par la déshydratation et la dépressurisation de ces gisements. Le procédé entraîne la production de volumes considérables d'eau (pouvant atteindre plus de 900 m^3/j par km^2) de qualité chimique médiocre (500 – 5 000 mg/L de matières dissoutes totales) qu'il faut évacuer. On ignore totalement l'impact de l'élimination de cette eau à la surface ou près de la sous-surface dans le milieu naturel au Canada. L'exploitation du méthane des gisements de houille est en train de devenir une source de plus en plus importante de gaz pour les États-Unis, et la production commerciale de ce gaz a commencé en Alberta en 2002.

Il serait utile d'examiner plus à fond les techniques de décontamination peu coûteuses, applicables sous le sol ainsi qu'à la surface. Nous avons en outre besoin de beaucoup plus de recherches sur les risques et les avantages de l'atténuation naturelle dans les milieux typiquement canadiens. On s'est en effet beaucoup inspiré jusqu'à maintenant des recherches effectuées aux États-Unis, où le climat, les types de sol, etc. peuvent être très différents. La pertinence de ces recherches pour le contexte canadien est souvent loin d'être idéale.

État des connaissances

Nous savons que les installations d'extraction, de production et de raffinage vieillissantes, les fosses de brûlage, les bassins à boue, les trous de forage incorrectement abandonnés, les déversements accidentels passés et les infrastructures souterraines vieillissantes peuvent tous aujourd'hui devenir des sources de contamination de l'eau souterraine. Les activités d'exploration et les gazoducs des contreforts et de l'Arctique poseront de nouveaux défis pour la protection et la décontamination de l'eau souterraine dans les milieux alpins, la forêt boréale et la toundra. L'exploitation des sables bitumineux entraîne la formation de grands puits et de bassins de résidus qui ont un impact sur la qualité de l'eau souterraine à l'échelle locale et régionale. Les opérations d'extraction in situ risquent d'influer sur la qualité chimique de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Ces opérations, conjuguées à la production classique de pétrole et de gaz, produisent de l'eau saumâtre qui doit être éliminée. L'extraction du méthane contenu dans les gisements de houille entraîne la production de volumes considérables d'eau souterraine saumâtre ou de qualité médiocre.

Problèmes à élucider

Nous n'avons pas d'information sur l'intégrité à long terme des pipelines, des dispositifs d'étanchéité des trous de forage, des bouchons en béton et des tubages en acier des puits. Nous ne savons pas non plus quel peut être l'impact ou l'ampleur de la contamination des eaux souterraines advenant la défaillance des puits dans un ancien champ pétrolifère. Nous comptons actuellement sur l'atténuation naturelle pour la remise en état de sites de production de pétrole et de gaz abandonnés, contaminés par des déversements d'hydrocarbures ou d'eau salée. Nous ignorons si cette stratégie est raisonnable, ou s'il conviendrait plutôt de recourir à des méthodes plus dynamiques et donc très coûteuses de décontamination. Nous avons besoin de méthodes de biorestauration peu coûteuses des sols et des eaux souterraines contaminés par les produits pétroliers et le sel dans les milieux canadiens. Les technologies actuelles ont été élaborées pour des sols et des conditions climatiques caractéristiques des régions tempérées du Canada. Nous ignorons quelle peut être leur efficacité dans les milieux alpins ou la toundra (hivers longs et froids, pergélisol). Nous avons besoin de procéder à des études hydrogéologiques fondamentales sur le méthane des gisements de houille et les zones frontières d'exploration pour parvenir à reconnaître et à surveiller les contaminants de l'eau souterraine. Nous avons également besoin d'évaluer l'efficacité des processus d'atténuation naturelle dans tous les milieux canadiens. Des recherches plus approfondies et des informations hydrogéologiques de base sont requises pour déterminer les incidences environnementales cumulatives à long terme des méga-projets d'exploitation minière de sables bitumineux et les impacts des activités minières et des bassins de résidus. Nous devons vérifier l'incidence possible des projets thermiques — par exemple, l'injection de vapeur pour faciliter la récupération de l'huile lourde — sur la présence de contaminants naturels dans l'eau souterraine et sur l'intégrité des couches de confinement sus-jacentes (risque de fracturation). Nous devons nous efforcer de caractériser les con-

nexions hydrologiques entre les formations de stockage des eaux usées et les aquifères peu profonds ou les eaux de surface. Par exemple, les cours d'eau du nord-est de l'Alberta sont-ils exposés à une contamination par les eaux usées engendrées par l'exploitation des sables bitumineux et qui sont évacuées dans des formations profondes? Nous avons besoin de vérifier la possibilité de rejeter les eaux saumâtres produites par l'exploitation du méthane des gisements de houille dans l'eau de surface (si la salinité est suffisamment faible, cette solution pourrait être envisageable) ou de les injecter sous la surface.

Perspectives politiques

La menace que font peser sur la qualité des eaux souterraines tous les aspects des activités du passé (exploration, production, stockage, transport et raffinage et production pétrochimique) constitue un défi de taille pour les pouvoirs publics et l'industrie. Nous devons par exemple reconnaître que nous en savons encore bien peu sur l'intégrité à long terme des bouchons en béton et des tubages en acier qui se trouvent dans les centaines de milliers de puits abandonnés d'un bout à l'autre du Canada. Comme la production pétrolière et gazière utilise de très vastes superficies de territoire, il est possible que la contamination des eaux souterraines qu'elle engendre englobe des régions ou des bassins hydrographiques entiers. Les coûts des mesures visant à assurer la sécurité des puits abandonnés ou la décontamination des aquifères sont considérables. Nous avons besoin de programmes publics d'études continues de la situation de base et de surveillance continue de la qualité chimique des eaux souterraines. Le recours à l'atténuation naturelle ou aux technologies actuelles de remise en état des sites contaminés risque de ne pas être efficace dans tous les milieux canadiens. En conséquence, les fonds pour la recherche et le développement industriels devraient être consacrés à la démonstration sur le terrain de concepts et de technologies de décontamination des eaux souterraines adaptés au contexte canadien. L'approbation de projets de mise en valeur de sources d'énergie non classique et d'exploitation des ressources en zones frontières sans acquisition préalable de connaissances fondamentales sur l'eau souterraine risque d'avoir à l'avenir des conséquences imprévisibles sur la qualité de l'eau souterraine à l'échelle régionale.

Références

van Everdingen, R.O. et R.A. Freeze. 1971. *Subsurface Disposal of Waste in Canada*. Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa, Technical Bulletin No. 49, 65 p.

2.11 Évaluation des risques

Contexte général

Les hydrogéologues et les responsables de la réglementation font grand usage des modèles informatiques pour simuler l'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants. Ces modèles, aussi connus sous le nom de modèles numériques, sont en général utilisés à deux fins principales : 1) fournir un aperçu des facteurs qui influent sur l'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants ou évaluer le bien fondé des hypothèses formulées concernant la nature des systèmes hydrogéologiques; 2) prédire l'évolution du régime des eaux souterraines. Les modèles informatiques présentent l'avantage principal de permettre l'étude de nombreux scénarios beaucoup plus rapidement qu'on ne le pourrait à l'échelle de temps propre aux écosystèmes naturels.

Les modèles informatiques conviennent particulièrement à la première de ces tâches puisqu'il est relativement facile d'en modifier les paramètres d'entrée afin d'évaluer les effets de ces changements sur le régime des eaux souterraines. De plus, grâce aux progrès réalisés en matière de vitesse de traitement des données des ordinateurs personnels, on peut réaliser et analyser en peu de temps toute une série de simulations. Cependant, on utilise communément les modèles informatiques pour chercher à prédire des événements futurs et on s'attend à ce qu'ils nous fournissent des informations exactes à ce sujet. Par exemple, on les utilise pour prédire les conséquences pour l'environnement hydrogéologique du déversement d'une substance dangereuse à la surface du sol. On cherche en particulier à répondre à des questions précises, par exemple : Le contaminant atteindra-t-il la nappe phréatique? Atteindra-t-il le puits local d'approvisionnement en eau? Quelles seront les concentrations du contaminant dans le puits? Combien de temps faudra-t-il au contaminant pour atteindre une concentration donnée dans le puits?

La méthode d'élaboration du modèle informatique est bien comprise et bien définie. Une des étapes cruciales consiste à estimer les valeurs des paramètres d'entrée et les conditions aux limites (p. ex., les valeurs de la conductivité hydraulique ou de la réalimentation, les niveaux d'eau de surface). Cela fait, on peut utiliser le modèle pour faire des prévisions.

Les modèles de simulation de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants se heurtent toutefois à une difficulté de taille : les conditions réelles sont beaucoup trop complexes pour qu'on puisse en simuler tous les aspects et tous les

détails. À l'échelle microscopique, l'eau souterraine et les contaminants s'écoulent à travers un réseau de pores et de fractures dont la répartition spatiale est impossible à mesurer sur le terrain ou à reproduire dans un modèle. À l'échelle macroscopique (bassin hydrographique), la présence de séries sédimentaires, les conditions météorologiques et hydrologiques variables et les conditions à la surface sont ici encore trop complexes pour pouvoir être entièrement modélisées. Toutes ces conditions ont pourtant une incidence sur l'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants. De plus, les études déjà réalisées sur l'eau souterraine et la contamination fournissent des données spatiales et temporelles beaucoup moins complètes que ce qu'on aurait pu espérer compte tenu de la complexité des milieux hydrogéologiques. Dans ces conditions, les modèles laissent énormément de place à l'interprétation et leurs prévisions s'entourent donc d'une grande incertitude et d'un risque considérable d'erreurs.

Questions principales

Les modèles informatiques qui simulent l'écoulement de l'eau souterraine et le transport des contaminants sont des outils précieux d'évaluation et de protection de la qualité des eaux souterraines. Malheureusement, leurs prévisions sont trop souvent très équivoques à cause de l'incertitude inhérente des paramètres d'entrée. Toutefois, il est possible de prendre cette incertitude en compte à l'étape de la prise de décisions grâce à l'évaluation des risques

Analyse d'incertitude

Les régimes d'eaux souterraines se caractérisent par une très grande variabilité naturelle. Par exemple, le processus de sédimentation dans les aquifères peut donner lieu à la formation de couches distinctes. Un aquifère de sable d'apparence homogène peut présenter des variations de conductivité hydraulique d'un ou de deux ordres de grandeur. Or, comme la conductivité hydraulique est un paramètre fondamental de l'écoulement de l'eau souterraine et, par ricochet, du transport des contaminants, une telle variabilité peut influer sensiblement sur l'écoulement de l'eau souterraine. En outre, il peut arriver qu'on ne connaisse qu'imparfaitement la nature exacte d'une source de contaminant (caractéristiques spatiales et temporelles). Peu importent le temps et les efforts que l'on consacre au travail sur le terrain, on n'arrivera jamais à caractériser un site avec une certitude absolue.

Cette incertitude inhérente aux systèmes naturels déteint sur les modèles numériques à l'étape de la conceptualisation du site hydrogéologique et de l'attribution de valeurs aux paramètres du modèle. Autrement dit, les paramètres d'entrée requis pour l'élaboration du modèle seront marqués par un certain degré d'incertitude qui influera considérablement sur les résultats tirés du modèle.

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'informatique, les spécialistes ont été en mesure de réaliser et d'utiliser des modèles plus complexes cherchant à reproduire d'une manière plus détaillée l'environnement et les processus hydrogéologiques. À mesure que les modèles informatiques gagnent en complexité, le nombre des paramètres d'entrée requis et, par ricochet, le degré d'incertitude entourant les prévisions de ces modèles augmentent également. Or, malgré leur grande complexité, ces modèles sont pour la plupart dépourvus d'une fonction d'analyse quantitative de l'incertitude des prévisions.

Diverses méthodes sont envisageables pour prendre en compte l'incertitude inhérente à la modélisation informatique. La première, à laquelle on a régulièrement fait appel par le passé, consiste à prétendre que l'incertitude n'existe pas puisque nous sommes en mesure de caractériser tous les facteurs dont nous avons besoin. Cette méthode n'est désormais plus acceptable. La deuxième méthode consiste à formuler une seule prévision assortie d'un biais raisonnable afin d'errer du côté de la prudence. La troisième méthode consiste à réaliser deux simulation : la première fondée sur le pire des scénarios envisageables, et la seconde fondée sur le « meilleur jugement technique ». S'agissant de l'évaluation environnementale, l'enjeu politique consiste à faire l'arbitrage entre ces deux simulations afin de prendre une décision.

Il existe une quatrième façon d'aborder ce problème : l'analyse d'incertitude. Au lieu de n'utiliser qu'un seul paramètre d'entrée obligatoire, cette technique prend en compte toute la gamme des valeurs connues de ce paramètre. S'agissant des mesures effectuées sur le terrain, on peut déterminer la distribution de probabilités d'un paramètre donné (p. ex., la conductivité hydraulique) pour ensuite calculer la moyenne, la variance et le degré de corrélation spatiale existant entre les mesures voisines. On utilise des ordinateurs puissants capables d'effectuer des milliers de simulations en utilisant une gamme de valeurs, et d'évaluer ensuite les résultats de ces multiples simulations pour produire une distribution probabiliste des résultats. On peut songer par exemple à la probabilité de contamination d'un puits donné par une substance particulière à l'intérieur d'une période de temps précise, compte tenu de l'incertitude entourant les paramètres d'entrée.

État des connaissances

Les milieux hydrogéologiques et les sources de contaminants se caractérisent par leur très grande variabilité. De plus, il est clair que nous ne serons jamais en mesure d'entreprendre des études en conditions réelles capables de caractériser entièrement un site donné. L'analyse d'incertitude permet de quantifier la probabilité des erreurs dans les simulations par ordinateur ou dans les prévisions qui en découlent. D'importants progrès ont été réalisés en matière de cadre conceptuel d'évaluation de l'incertitude des prévisions, et de prise en compte de cette incertitude dans le processus décisionnel (évaluation des risques). Nous disposons désormais des méthodes mathématiques quantitatives nécessaires à la conduite de l'analyse d'incertitude ayant trait aux simulations hydrogéologiques. Les spécialistes des eaux souterraines se servent déjà de ces nouveaux outils, mais on ne les utilise encore que rarement pour la prise de décisions réglementaires. Nous savons par ailleurs que l'incertitude des prévisions n'est pas immuable, mais qu'elle évolue au contraire à mesure qu'on améliore les modèles, qu'on accumule les données et qu'on acquiert plus de connaissances et d'expérience.

Problèmes à élucider

Nous pouvons quantifier l'incertitude entourant la prévision d'un modèle informatique en fonction de l'incertitude qui entoure la caractérisation d'un site hydrogéologique. Toutefois, nous ignorons toujours quelle est la quantité de données requises pour caractériser correctement un système afin de réduire l'incertitude à un niveau acceptable. La collecte de données supplémentaires coûte plus cher, mais il arrive un point à partir duquel ces données supplémentaires n'ont plus d'effet sur le degré d'incertitude. Par exemple, avons-nous besoin de 10, de 100 ou de 1 000 mesures de la conductivité hydraulique à un site donné? Nous savons que l'incertitude qui entoure la caractérisation d'un site conduira à l'incertitude de la prévision du modèle, mais nous ignorons quelle est la part de l'incertitude de la prévision attribuable au modèle lui-même. Par exemple, quel degré d'erreur peut être attribuable au choix entre un modèle à deux dimensions et un modèle à trois dimensions pour l'analyse d'un site donné? Quelle peut être l'incidence d'une erreur dans le choix de la source de contaminant? Il existe des outils quantitatifs utilisables pour réaliser l'analyse d'incertitude, mais ces outils ne sont pas assez conviviaux pour permettre aux responsables de la réglementation d'en faire une large utilisation (il existe actuellement peu de systèmes automatisés, sinon aucun).

Perspectives politiques

Les modèles informatiques peuvent être très utiles pour étudier les problèmes de qualité des eaux souterraines. Cependant, les prévisions tirées de ces modèles s'entourent d'un haut degré d'incertitude. Dans l'état actuel de nos connaissances, nous sommes en mesure d'évaluer les prévisions en tenant compte de l'incertitude qui entoure la caractérisation d'un site donné, et nous sommes capables d'intégrer cette connaissance à la modélisation de la qualité des eaux souterraines. Toutefois, ces techniques n'ont été jusqu'à maintenant utilisées que dans un nombre limité de cas. Comme l'analyse d'incertitude constitue un moyen très utile de quantifier les erreurs et l'incertitude, elle devrait faire partie intégrante des processus d'évaluation et de prévision afférents aux prises de décisions et à l'élaboration des politiques sur la qualité des eaux souterraines.

Il conviendrait de promouvoir l'amélioration de l'analyse d'incertitude ayant trait à la caractérisation des paramètres et des erreurs des modèles. Dans la pratique, l'élaboration de modèles toujours plus complexes pour représenter les processus hydrogéologiques semble prendre le pas sur la détermination quantitative de l'incertitude des prévisions. Les responsables de la réglementation peuvent encourager les auteurs de projets et leurs consultants à adopter plus fréquemment des méthodes d'évaluation des incertitudes en matière de prévisions dans l'utilisation des modèles d'eaux souterraines aux fins de la gestion et de la protection des systèmes d'eaux souterraines. Ils devront vraisemblablement pour cela accepter certains compromis quant au degré de complexité des modèles. Lorsque c'est possible, la modélisation informatique devrait dépasser l'étape des calculs déterministes et opter pour un biais raisonnable, pour des études sur la sensibilité ou pour des évaluations de la pire éventualité

Les thèmes de recherche émergents font appel à l'élaboration de techniques plus puissantes de cartographie de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques. Nous avons besoin de recherches sur la quantification de l'incertitude des prévisions qui peut être attribuée à des erreurs dans les données (À partir de quel point la collecte de données supplémentaires ne permet-elle plus de réduire le degré d'incertitude?) et à la structure du modèle (Quelle peut être l'incidence d'un modèle numérique incorrect ou d'une interprétation erronée d'un modèle conceptuel?).

Références

Morgan, M.G. et M. Henrion. 1990. *Uncertainty: A Guide to dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge Press, 344 p.

Freeze, R.A. J. Massmann, L. Smith, T. Sperling et B. James. 1990. Hydrogeological decision analysis: 1. a framework. *Ground Water*, 28(5):738-766.

Massmann, J. R.A. Freeze, L. Smith, T. Sperling et B. James. 1991. Hydrogeological decision analysis: 2. application to ground water contamination. *Ground Water*, 29(4):536-548.

Smith, L. et P. Gaganis. 1998. Strontium-90 migration to water wells at the CNNP: Re-evaluation of a decision model. *Environmental and Engineering Geoscience*, IV(2).

Gaganis, P. et L. Smith. 2001. A Bayesian approach to the quantification of the effect of model error on the predictions of groundwater models. *Water Resources Research*, 37(9):2309-2322.

2.12 Aperçu de la qualité de l'eau des puits ruraux au Canada

Contexte général

Le quart environ des Canadiens dépendent des eaux souterraines comme source d'eau potable. Cette proportion tient compte des résidences, des installations récréatives (chalets, centres de villégiature, terrains de camping, etc.) et des municipalités. La plupart des provinces ont procédé à des études de la qualité des eaux souterraines dans les puits ruraux. Les analyses réalisées dans le cadre de ces études ont principalement porté sur les trois contaminants principaux des zones rurales ou agricoles : les nitrates, les bactéries et les pesticides.

Les études actuelles varient beaucoup par leur portée, leurs objectifs et les méthodes employées. En conséquence, une étude qui évalue les puits très exposés dans une zone où on utilise des pesticide et une autre qui porte sur un échantillon de puits choisis au hasard dans une région vont forcément mesurer des pourcentages de pesticides différents. Il convient en outre de réaliser que les tests réalisés sur l'eau des puits ne refléteront pas nécessairement la contamination des aquifères. La découverte de contaminants dans un puits risque de trahir un problème de construction du puits ou de contamination de surface, plutôt que l'écoulement dans le puits d'eau souterraine contaminée. Toutefois, il est possible, grâce à la compilation d'études régionales spécialisées, d'obtenir un aperçu national de la qualité des eaux souterraines dans les puits ruraux.

Questions principales

De nombreuses études de la qualité de l'eau des puits portent régulièrement à conclure que les agents pathogènes représentent de loin les contaminants les plus communs de l'eau des puits au Canada. De 10 à 40 % de tous les puits ruraux présentent des concentrations de bactéries coliformes supérieures aux RQEPC. Les concentrations de nitrates dépassent les taux recommandés dans environ 15 % des puits ruraux. Par contre, les pesticides ne dépassent les concentrations acceptables que dans environ 0,5 % des puits ruraux. Les produits chimiques industriels comme le trichloroéthylène (TCE) ont été identifiés dans environ 10 % des réservoirs municipaux d'eau souterraine, mais presque toujours à des concentrations de beaucoup inférieures aux seuils recommandés pour l'eau potable.

Résumé des études provinciales

Les bactéries constituent la catégorie de contaminants la plus commune dans les puits ruraux. Les études de la qualité de l'eau des puits réalisées en Ontario (1 208 puits), au Nouveau-Brunswick (583 puits) et au Québec (150 puits) ont laissé constater que la proportion des puits dont l'eau présente des taux de coliformes fécaux supérieurs aux RQEPC atteint 25, 4 et 6–36 % respectivement dans ces provinces. Les nitrates viennent au deuxième rang des contaminants les plus communs dans les puits ruraux. On a mesuré des concentrations de nitrates supérieures aux RQEPC dans 10 % des 240 puits testés en Colombie-Britannique, 6 % des 813 puits testés en Alberta, 17 % des 1 484 puits testés en Saskatchewan, 2–19 % des 29–119 puits testés au Manitoba, 13–14 % des 1 212 puits testés en Ontario et 15–26 % des 296 puits testés au Nouveau-Brunswick. On a détecté des pesticides dans un nombre relativement limité de puits ruraux, et les concentrations sont rarement supérieures aux RQEPC. On n'a mesuré des concentrations de pesticides supérieures aux RQEPC que dans 0,5 % des 1 300 puits testés en Ontario, 4,3 % des 70 puits testés au Québec (dans une zone d'agriculture intensive) et 0,4 % des 824 puits testés en Alberta. Aucun des 184 puits testés en Saskatchewan et aucun des 240 puits testés en Colombie-Britannique n'en contenaient. Ces résultats sont d'autant plus crédibles qu'ils ressemblent à ceux obtenus aux États-Unis et dans d'autres pays.

Les oligo-éléments naturels comme l'arsenic et les fluorures sont aussi à surveiller et peuvent devenir plus préoccupants à mesure qu'on creuse plus pro-

fondément afin de contourner l'eau souterraine contaminée près de la surface. Les substances chimiques industrielles sont rares dans les puits ruraux. Les puits municipaux sont plus exposés à ce genre de contamination causé par les carburants, les produits de nettoyage à sec, les solvants, les PCB, etc., puisque les sources de ces contaminants se trouvent en général dans des zones urbaines ou industrielles.

État des connaissances

Les bactéries et les nitrates sont les principaux contaminants des puits ruraux. On ne trouve des concentrations de pesticides supérieures aux RQEPC que dans très peu de puits. On trouve parfois du TCE et du PCE dans les puits municipaux. En extrapolant à partir des résultats des tests de la qualité de l'eau des puits, on estime qu'environ un million de Canadiens dépendent quotidiennement de puits non conformes aux recommandations relatives aux concentrations de bactéries, et que beaucoup d'autres sont exposés de façon sporadique à ce type de contamination. Toutefois, nous possédons peu de données portant sur des cas documentés de consommateurs d'eau de puits présentant des symptômes, et la plupart des statistiques sur les maladies causées par l'eau correspondent donc à des « estimations » ou à des « extrapolations ». Il est possible que les cas décrits ne soient pas tous causés par une source de contaminant (p. ex., épandage de fumier dans un champ) ou par un problème de puits (p. ex., cuvelage corrodé), mais qu'ils découlent plutôt de problèmes de distribution ou de traitement (p. ex., chloruration, conduites qui fuient). Des études de la USEPA, extrapolées pour le Canada, donnent à conclure que les agents pathogènes des réserves d'eau souterraine causent chaque année plusieurs cas de troubles gastro-intestinaux au Canada.

Les études suggèrent que la contamination de l'eau des puits est souvent due à un mauvais choix d'emplacement du puits (trop proche d'un site d'évacuation de fumier ou d'une fosse septique), d'une construction défaillante (pas de dispositif d'étanchéité à l'extérieur du cuvelage, fuites), à un problème d'entretien (pas de couvercle), ou à une profondeur de forage insuffisante. Toutefois, dans beaucoup de cas de contamination de l'eau des puits, la source et la voie de contamination restent difficiles à déterminer.

Problèmes à élucider

On sait encore très peu de choses sur la façon dont les agents pathogènes se déplacent et survivent dans les eaux souterraines. En fait, les études ont pour la plupart mis l'accent sur les bactéries coliformes, et peu d'entre elles se sont intéressées aux autres agents pathogènes comme les virus. Nous ne savons pas exactement dans quelle mesure la contamination microbiologique de l'eau des puits reflète la contamination de l'eau souterraine environnante et dans quelle mesure elle dépend des puits eux-mêmes. Nous ne savons pas si la contamination par les nitrates s'étend en superficie et en profondeur, et nous ignorons qu'elles peuvent être l'utilité et l'efficacité des mesures actuelles de protection des sources pour prévenir la contamination de l'eau des puits par des agents pathogènes, les nitrates et d'autres contaminants.

L'infiltration des eaux souterraines dans les rivières, les lacs et les estuaires se produit lentement, et ses effets sur la qualité des eaux de surface sont habituellement faibles comparativement aux effets du ruissellement et de l'érosion. Au Canada, il existe peu de cas documentés où l'apport d'eau souterraine contaminée a eu un effet important sur les eaux de surface et l'écologie aquatique. Il faudrait faire une étude de ces effets à l'échelle nationale puisque nous en ignorons l'importance et que nous ne connaissons pas les meilleurs moyens de les prévenir.

Il n'existe pas d'étude nationale sur la qualité des eaux souterraines ni sur la contamination de l'eau des puits au Canada. En fait, nous ne pouvons même pas compter sur une évaluation fiable et à jour de l'utilisation de l'eau souterraine au Canada. La dernière évaluation nationale de l'utilisation de l'eau souterraine a été réalisée en 1981. Toutefois, il est possible d'estimer la proportion des Canadiens qui dépendent de puits contaminés comme source d'eau potable en s'appuyant sur les résultats de nombreuses études régionales et provinciales, et en extrapolant à partir des mesures de la proportion des puits dont l'eau présente des concentrations de contaminants supérieures aux RQEPC.

Perspectives politiques

L'omniprésence des cas de contamination de l'eau des puits par des agents pathogènes au Canada constitue un problème de santé publique. Les États-Unis proposent de protéger l'eau potable en tenant pour acquis que l'eau des puits ne saurait être considérée comme sûre à priori, et qu'il est donc nécessaire d'en prouver l'innocuité. Cette approche irait à l'encontre de la politique actuellement en vigueur au Canada et aux États-Unis et en vertu de laquelle l'eau souterraine est jugée sûre jusqu'à preuve du contraire. On devrait peut-être songer à l'adopter dans les régions du Canada exposées à un risque élevé de contamination.

Tableau 3: Aperçu des puits contaminés au Canada (selon van der Kamp, 2003)

Contaminant	RQEPC (CAM ou CAMP)	Puits	% des puits non conformes aux RQEPC	Population estimée dépendant de puits non conformes aux RQEPC
Arsenic	25 µg/L	tous	3 - 8	300 000
TCE et PCE	30 à 50 µg/L	municipaux	0,2 - 0,6	70 000?
Pesticides	2 à 200 µg/L	ruraux	0,0 - 0,5	10 000
Nitrates	45 mg/L	ruraux	5 - 17	400 000
Bactéries	0 E coli/100 mL<5 ou 10 coliform/100 mL	ruraux	10 - 36	1 000 000

De nombreuses enquêtes ont déjà été réalisées d'un bout à l'autre du Canada sur la qualité de l'eau des puits. Nous avons maintenant besoin d'une étude critique de toutes ces enquêtes, suivie d'études sur a) la source, le transport et le devenir des pathogènes sous la surface du sol, b) la santé publique, en rapport avec la contamination de l'eau, c) les mesures de protection des sources et d) les pratiques de localisation, de construction et de mise hors service des puits.

Références

Hess., P.J. 1986. *Utilisation des eaux souterraines au Canada, 1981. Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada*, Ottawa, bulletin technique nº 14, 45 pages.

Rudolph, D.L., D.A.J. Barry and M.J. Goss. 1998. Contamination of Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture. 2. results from multilevel monitoring well installations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 32:295-311.

Chapitre 3.

Qualité des eaux souterraines : projets et perspectives

Les organisateurs du présent atelier ont rapidement constaté qu'il existait d'autres initiatives en cours ou projetées ayant directement trait à la qualité des eaux souterraines au Canada. On a donc décidé de présenter de courts comptes rendus de trois de ces initiatives : le Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine, le plan d'action du CCME pour la surveillance de la qualité de l'eau et le Réseau canadien de l'eau. On a en outre jugé que cette séance serait le moment logique pour examiner deux approches — l'une municipale et l'autres américaine — pour assurer une meilleure liaison entre les recherches portant sur la qualité des eaux souterraines et l'élaboration des politiques. Cette séance ayant pour thème « Qualité des eaux souterraines : projets et perspectives » a également fourni l'occasion d'explorer les avenues possibles de promotion du dialogue entre la communauté scientifique et les responsables des politiques.

Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine

Un comité national spécial sur l'eau souterraine composé de représentants du gouvernement, de l'industrie et des universités a élaboré un cadre de collaboration pour l'étude des eaux souterraines qui préconise une vision commune des moyens à mettre en œuvre pour gérer, protéger et préserver les ressources canadiennes en eaux souterraines. Cette collaboration visera quatre grands objectifs :

1. promouvoir l'acquisition de données de qualité et de connaissances de pointe sur l'eau souterraine;
2. améliorer les communications entre les intervenants dans ce domaine ainsi que leur collaboration;
3. mettre en place des liens efficaces entre les systèmes d'information sur l'eau souterraine;
4. constituer une base de ressources accessible à tous les paliers de l'administration publique et à tous les intervenants.

Au cours des récentes années, il est devenu évident qu'en raison des restrictions financières, de la nécessité d'une approche multidisciplinaire et de la nature intergouvernementale de la gestion des eaux souterraines, il serait impossible de confier à une seule organisation la responsabilité de l'ensemble du dossier. Pour gérer avec succès les ressources canadiennes en eaux souterraines, il était nécessaire de promouvoir une collaboration étroite de tous les ordres de gouvernement et de l'ensemble des intervenants.

Le document du cadre de collaboration énumère une série de programmes nationaux de coopération recommandés à l'occasion d'ateliers nationaux tenus à Québec, en 2000, et à Calgary, en 2001. Il s'agit d'un document de travail élaboré pour stimuler les débats et qui ne représente pas nécessairement le point de vue des administrations publiques ou des organismes non gouvernementaux.

La structure du cadre est conçue pour permettre aux responsables de l'élaboration des politiques et de la réglementation de mieux tirer parti des ressources actuelles de la science et de la technologie, tout en tenant compte des compétences respectives de chaque ordre de gouvernement dans l'ensemble des provinces et des territoires du Canada et en reconnaissant la contribution des universités, de l'industrie et des autres intervenants.

Pour en savoir plus : http://www.cgq-qgc.ca/cgsi

Plan d'action du CCME pour la surveillance de la qualité de l'eau

Il n'existe à l'heure actuelle aucun réseau national de surveillance de la qualité de l'eau au Canada. Cette responsabilité est répartie entre diverses agences et divers ordres de gouvernement, et les organes de coordination sont rares. Les efforts de surveillance sont donc souvent fragmentaires, ignorant certains problèmes ou agresseurs importants, et les divers programmes existants ainsi que les données ou l'information qu'ils diffusent ne sont pas intégrés pour donner un aperçu régional ou national de la situation. Avec les problèmes de santé publique dus à la piètre qualité de l'eau survenus à Walkerton, à North Battleford et dans d'autres collectivités canadiennes, les appels en faveur d'une information fiable et à jour en cette matière se sont multipliés. Sans le bénéfice d'une base d'information intégrée, il reste souvent difficile de fournir aux Canadiens des informations actuelles à l'échelle régionale et nationale, ce qui nuit à l'efficacité des décideurs.

En mai 2001, les ministres de l'environnement du Canada se sont engagés à intégrer les réseaux existants de surveillance de la qualité de l'eau pour faire

en sorte que les Canadiens puissent compter sur des informations complètes. Le plan d'action du CCME sur l'eau a été élaboré dans ce but; il vise à unir les efforts en vue de la mise en place d'un « réseau de réseaux et de programmes » canadiens de surveillance de la qualité de l'eau. Ce réseau sera exploité en coopération par de multiples instances et partenaires et aura pour objectif d'établir une base de données nationale sur la qualité de l'eau. Il fera sienne la Déclaration de principes du CCME pour orienter les ententes de coopération sur la surveillance et la production de rapports et appliquera ces principes dans ses actions.

Le CCME a financé un atelier national d'experts en surveillance de la qualité de l'eau, de gestionnaires et d'intervenants qui s'est tenu en octobre 2002 et au cours duquel les participants ont débattu des moyens disponibles à l'heure actuelle, des efforts déployés, des nouveaux défis, des occasions de progrès, des leçons apprises, des stratégies et des options offertes en matière de renforcement des liens entre les réseaux en place au Canada..

Réseau canadien de l'eau

Le Réseau canadien de l'eau (RCE) est un réseau de Centres d'excellence financé par le gouvernement fédéral. Il a pour mission d'assurer que le Canada maintienne un rôle de chef de file en matière de gestion et d'utilisation durables des ressources en eau, de protection de la santé des humains et des écosystèmes aquatiques, et de maintien de la croissance économique des secteurs de la technologie et des services dans le domaine de l'eau. Le RCE a pour rôle principal de promouvoir une vision intégrée, cohérente et nationale de la gestion de l'eau et de veiller à ce que les recherches nous fournissent les outils nécessaires à la conduite efficace et objective des débats sur les politiques nationales et l'élaboration de la réglementation.

Ce réseau, dont le siège se trouve à la University of Waterloo, a été mis sur pied en novembre 2001. Il compte 175 chercheurs de 38 universités, 29 entreprises et 40 organismes publics.

Le RCE s'est donné pour principale mission d'encourager la diffusion des connaissances et des technologies par le biais de recherches multidisciplinaires menées sous les auspices de divers ordres de gouvernement. Au nombre des thèmes qu'il est censé aborder, on peut mentionner la gestion des eaux usées, la salubrité de l'eau potable, les infrastructures et les eaux souterraines.

Le RCE vise à mettre sur pied un réseau d'experts hautement qualifiés afin de lutter contre la réduction des dépenses consacrées à la prévention, à la surveillance et à la correction des problèmes liés à l'eau par divers ordres de gouvernement au Canada. Il fait valoir que le Canada est toujours dépourvu d'une stratégie nationale de l'eau. Il souhaite jouer un rôle de catalyseur des actions, favoriser l'établissement de réseaux, promouvoir un programme de recherche très diversifié et resserrer les liens entre les universités, les organismes publics et l'industrie.

Pour en savoir plus : http://www.nce.gc.ca/nces-rces/cwn_f.htm

Une approche municipale

La Fédération canadienne des municipalités (FCM) a créé un groupe d'étude sur la politique nationale et les options relatives à l'eau afin d'influer sur la réglementation fédérale, les budgets (y compris sur l'eau souterraine) et la qualité de l'eau potable. Le groupe s'est surtout intéressé à la gestion des bassins hydrographiques. La FCM préconise la délimitation des bassins hydrographiques ainsi qu'une détermination plus exacte des utilisations des terres qui risquent d'influer sur la qualité des eaux souterraines afin d'améliorer les stratégies de gestion du risque.

Les municipalités ne sont pas toujours capables d'assurer un approvisionnement adéquat en eau potable. Il conviendra de mobiliser tous les niveaux de gouvernement pour faire en sorte que l'infrastructure bénéficie des financements adéquats, que des normes nationales de la qualité de l'eau soient édictées et que la formation des opérateurs soit améliorée. La FCM préconise le recouvrement intégral des coûts des services d'infrastructures; elle insiste sur l'importance d'une gestion de la demande d'eau et sur la nécessité d'améliorer la planification de l'utilisation des terres pour en réduire les répercussions négatives sur la qualité de l'eau. On a fait valoir à ce propos que le U.S. Safe Drinking Water Act exige une évaluation des approvisionnements publics en eau potable, et qu'on a consacré à cette tâche, depuis 1998, une somme annuelle de 26 milliards de dollars provenant des fonds de crédits renouvelables de l'État. On a indiqué que cette stratégie pourrait servir de modèle pour le Canada.

L'approche américaine

On a donné pour preuve de l'engagement plus concret des autorités fédérales américaines dans le domaine des ressources en eau l'existence des programmes National Water Quality Assessment (NAWQA) et Regional Aquifer System Analysis (RASA) du U.S. Geological Survey. Le programme

NAWQA a pour objectif à long terme d'évaluer la qualité actuelle des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines de l'ensemble du pays, d'en déterminer les tendances, et d'acquérir de solides connaissances scientifiques sur les principaux facteurs influant sur la qualité de ces ressources.

Pour promouvoir l'établissement de liens plus étroits entre les sciences et les politiques aux États-Unis, le U.S. Water Science and Technology Board (du U.S. National Research Council) s'est employé à servir de centre de liaison pour les études consacrées aux ressources en eau. Il s'est donné pour objectif de renforcer les moyens scientifiques et technologiques fondamentaux afin de résoudre les questions et les problèmes importants que posent la gestion et l'utilisation efficaces des ressources en eau. Le Board fait souvent appel à des groupes sélects (Blue Ribbon Panels) constitués de chercheurs de renom qu'il charge de se pencher sur des questions d'actualité.

Il existe par ailleurs aux États-Unis de nombreux groupes environnementalistes bien financés (p. ex., le Natural Resources Defense Council) qui se sont donnés pour objectifs de promouvoir une gestion écologique des ressources et de sensibiliser le public aux questions importantes en cette matière. Contrairement à ce qui se passe au Canada, les principales organisations américaines de financement (p. ex., la National Science Foundation) préconisent une approche proactive en matière de recherches, et mettent l'accent sur les recherches qui influent sur les problèmes humains.

Les principaux points à retenir sont les suivants : des recherches scientifiques de qualité sont essentielles à l'élaboration de politiques rationnelles; les groupes sélects sont utiles pour résoudre les problèmes; s'agissant du financement, la « politique de la carotte et du bâton » joue un rôle utile d'orientation des recherches en faveur des secteurs prioritaires; l'ampleur et la complexité des problèmes liés à l'eau justifient de recourir à une approche multidisciplinaire: le changement de paradigme en faveur des « technologies vertes » offre au Canada d'importantes possibilités de développement industriel.

Pour en savoir plus : http://www7.nationalacademies.org/wstb/WSTB_Mission_Statement.html

Chapitre 4.

Qualité des eaux souterraines au Canada : état des lieux et leçons à tirer

par John A. Cherry, professeur, titulaire de la chaire de recherche industrielle sur l'hydrogéologie des contaminants, CRSNG

Nous présentons ci-dessous le résumé d'un discours de table prononcé par M. John Cherry dans le cadre de l'atelier, des points qui ont été soulevés pendant la période de questions qui a suivi et des débats qu'ils ont suscité par la suite.

État des lieux

Huit millions de Canadiens dépendent de l'eau souterraine pour leurs approvisionnements en eau potable. Ces ressources ont été négligées pendant très longtemps dans presque toutes les régions du Canada à cause des défaillances de la réglementation canadienne ayant trait à leur surveillance, à leur gestion et à leur protection. Toutefois, les tragédies que nous avons connues récemment ont provoqué une véritable prise de conscience collective. Les responsables des politiques reconnaissent désormais l'urgence pour les pouvoirs publics d'intervenir plus activement dans la gestion des eaux souterraines. Les conditions sont donc réunies pour permettre aux chercheurs et aux responsables des politiques d'influer durablement sur la situation des eaux souterraines au Canada. Nous présentons diverses recommandations sur les mesures peu coûteuses qui pourraient être prises dans ce contexte.

Le Canada et l'environnement

Le Canada fait piètre figure comparativement aux autres pays développés en matière de protection de l'environnement. Selon une évaluation récente réalisée par un groupe de chercheurs en droit et en politique de l'environnement de l'Université de Victoria et fondée sur des données recueillies par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), le Canada obtiendrait une des pires notes de tous les pays industrialisés en matière d'environnement. Selon cette étude portant sur 25 indicateurs environnementaux, le Canada se classerait au 28^{e} rang des 29 pays membres de l'OCDE examinés.

Le Canada et la qualité des eaux souterraines

Il est clair qu'en ce qui concerne la protection de la qualité des eaux souterraines, le Canada se classe loin derrière les États-Unis et certains pays d'Europe du Nord. Voici quelques-unes des observations qui nous poussent à faire ce constat :

1. Les gens se montrent de plus en plus préoccupés par la qualité des approvisionnements en eau; la consommation d'eau embouteillée fait aujourd'hui partie des mœurs d'un nombre grandissant de Canadiens.
2. Rien n'est fait pour anticiper ou prédire les problèmes par l'examen des cas de contamination survenus dans d'autres pays.
3. La contamination des eaux souterraines hors des limites des terrains privés n'est pas strictement illégale, ce qui n'encourage pas beaucoup les gens à éviter de tels problèmes. Pourtant, presque tous les cas de contamination des eaux souterraines survenant sur des terrains privés finissent par déborder des limites de ces terrains au fil des ans ou des décennies.
4. Les lois et les règlements ayant trait à la protection des eaux souterraines sont souvent inefficaces ou ignorées dans la plupart des régions du Canada. L'application défaillante de la réglementation est souvent due au nombre insuffisant d'agents de l'État ou au manque de volonté politique.
5. On observe une certaine réticence à appliquer des normes nationales minimales ou des règles ayant trait à la qualité des eaux souterraines; chaque province agit en vase clos, et il existe un vaste écart entre la meilleure et la pire.
6. Il existe un large fossé entre la masse des connaissances dont disposent les scientifiques et la portion de ces connaissances utilisées par les décideurs.
7. Les fonds publics déjà limités qui sont disponibles servent surtout à corriger des problèmes immédiats présentant une dimension politique au lieu d'être consacrés à la recherche de solutions durables fondée sur une évaluation rationnelle et organisée des risques posés pour la santé des humains et pour l'environnement et des coûts-avantages.

Il existe de nombreux exemples de crises de l'eau souterraine survenues au Canada ou les risques politiques ont constitué le principal, sinon le seul motif d'intervention par les décideurs. On peut mentionner en particulier les incidents de Regina (Saskatchewan), Smithville, Elmira et Walkerton (Ontario), et Ville

Mercier (Québec). Le scénario est presque toujours le même : les pouvoirs publics sont pris par surprise et réagissent en prenant des décisions non scientifiques, causant ainsi un énorme gaspillage de fonds publics et mettant à mal la confiance du public. Lorsque les décideurs finissent enfin par prendre acte des informations disponibles auprès de la communauté scientifique, d'énormes sommes d'argent sont déjà engagées, et toutes sortes de promesses sont déjà faites. Pour éviter ce genre de situation, les hauts responsables de l'administration publique devront prendre conscience des dépenses inutiles qu'entraîne l'approche actuelle et mettre ensuite en place les mécanismes qui permettront de tirer parti des connaissances scientifiques disponibles ou d'acquérir en temps utile celles dont nous avons besoin pour réagir efficacement aux crises.

Quelques particularités de la contamination des eaux souterraines

Le problème de la contamination des eaux souterraines présente des caractéristiques uniques qui justifient une gestion différente de celle utilisée pour les eaux de surface :

- Les contaminants des eaux souterraines sont pour la plupart impossibles à détecter par leur goût, leur couleur ou leur odeur. Les gens ne se rendent donc souvent pas compte des dangers qu'ils peuvent courir puisque l'eau qu'ils boivent est claire, fraîche et sans goût suspect.
- La plupart des cas de contamination aujourd'hui relevés dans les puits découlent d'événements survenus il y a longtemps, et les rapports de cause à effet sont donc souvent difficiles à établir.
- Les panaches de contaminants sont souvent difficiles à localiser dans les aquifères.
- Le nombre d'aquifères utilisés en guise de sources d'eau potable au Canada est de loin supérieur au nombre de cours d'eau et de lacs utilisés à cette fin.
- La plupart des habitants des zones rurales qui dépendent de puits pour s'approvisionner en eau vivent à l'écart ou dans de petites agglomérations et utilisent donc des puits privés.

Il est beaucoup plus difficile de protéger les consommateurs qui utilisent l'eau souterraine que ceux qui s'approvisionnent à même les cours d'eau et les lacs (il est presque impossible de localiser les puits correctement, de procéder à des échantillonnages adéquats d'eau souterraine et d'analyser chaque contaminant possible pour garantir la détection d'un problème de contamination avant qu'il n'affecte des puits publics). Compte tenu des lacunes des contrôles en place, l'eau souterraine contaminée cause probablement plus de problèmes de santé au Canada que l'eau de surface contaminée.

Pourquoi le Canada traîne-t-il si loin derrière les États-Unis, l'Allemagne, le Danemark et d'autres pays pour ce qui est du contrôle, de la gestion et de la protection des eaux souterraines?

C'est à cause de notre système politique :

- Les simples députés du parti au pouvoir ou de l'opposition ont rarement l'occasion de proposer des dispositions législatives. Ceux d'entre eux qui sont sensibles aux questions environnementales ou qui se préoccupent de problèmes de contamination locaux restent donc impuissants à changer les choses.
- Selon notre Constitution, les eaux souterraines sont de compétence provinciale, ce qui complique les interventions des autorités fédérales (p. ex., pour voir à la cohérence des règlements et intervenir en cas de crise).
- Comme on ne peut changer le système politique, il faudra intervenir dans le cadre de ce système, exercer des pressions et faire preuve de persévérance.

Comment surmonter les obstacles créés par notre système politique?

- Les fonctionnaires de tous les ordres de gouvernement doivent s'efforcer, dans toute la mesure du possible, de faire avancer les choses, notamment lorsque le climat politique s'y prête.
- Pour résoudre les problèmes, il faut s'appuyer sur les données scientifiques plutôt que sur d'autres perceptions de la réalité.
- Les ONG environnementalistes comme Enquête pollution, le Sierra Club et Greenpeace sont essentielles pour sensibiliser le public et exercer des pressions politiques.
- Les membres de la communauté scientifique doivent jouer un rôle plus actif; ils doivent mettre les décideurs et les professionnels au fait des progrès de la recherche scientifique.
- Les organismes gouvernementaux doivent solliciter la contribution des chercheurs pour tirer parti de leurs connaissances scientifiques, ainsi que de ce qu'ils savent des politiques et des activités relatives aux eaux souterraines mises en œuvre dans d'autres pays.

Quelques suggestions de mesures qui n'exigeraient pas de nouveaux investissements importants

1. Mettre sur pied une organisation indépendante, financée par le gouvernement fédéral, semblable à la National Academy of Sciences des États-Unis
   - pour mobiliser les membres de la communauté scientifique canadienne et utiliser leurs connaissances pour chercher des solutions aux problèmes de portée nationale et provinciale préoccupant l'ensemble de la société canadienne.
2. Créer un bureau capable d'intervenir rapidement et de fournir des conseils scientifiques crédibles en cas de crise environnementale (p. ex., semblable au Secrétariat de l'environnement du CNRC, aboli en 1982).
3. Renforcer les services d'audits environnementaux du bureau du vérificateur général du Canada pour obtenir des rapports indépendants et fiables de l'état de l'environnement au Canada, y compris pour les eaux souterraines.
4. Mettre sur pied dans chaque province des organisations permanentes d'enquêtes hydrogéologiques chargées de recueillir et de compiler des données sur le sous-sol (recherche appliquée).
5. Rationaliser les mandats confiés à chacun des ministères fédéraux en matière de recherche sur les eaux souterraines pour qu'ils tiennent mieux compte des besoins globaux et des moyens dont dispose le Canada en matière de recherche.
6. Élaborer un cadre amélioré d'orientation et de financement de la recherche menée dans les universités canadiennes pour faire en sorte que cette recherche se penche sur les problèmes canadiens.
7. Mettre en place un bureau fédéral de surveillance des stratégies et des pratiques en vigueur à l'étranger dans les domaines du contrôle, de la gestion et de la protection des eaux souterraines pour faire en sorte que le Canada puisse s'inspirer plus utilement des progrès réalisés dans d'autres pays. Ce bureau devrait élaborer des lignes directrices ou des recommandations minimales à l'aune desquelles les provinces pourraient mesurer leur conformité.
8. Sensibiliser les politiciens aux problèmes liés aux eaux souterraines et à leurs incidences économiques pour qu'ils se rendent mieux compte des besoins en matière de législation ou de réglementation dans ce domaine.

Quelques signes encourageants

Même si j'ai insisté sur les retards que le Canada accuse par rapport à d'autres pays comparables en matière de gestion des eaux souterraines, nous pouvons faire état de certains signes encourageants qui laissent espérer une amélioration de la situation à plus long terme :

- la création et la mise en vigueur de la Loi sur la protection des eaux souterraines au Nouveau-Brunswick;
- la mise en place par les autorités régionales (municipales) et par les services locaux de conservation des ressources de plusieurs régions ontariennes (par exemple, à Waterloo) de groupes de spécialistes des eaux souterraines;
- la création récente de quatre nouveaux postes de professionnels des eaux souterraines en Nouvelle-Écosse (ce qui porte à six le nombre de ces spécialistes provinciaux des eaux souterraines qui était passé de 8 en 1980 à 2 en 2000).

La question principale

La prise de conscience provoquée par Walkerton au sein des ministères canadiens de l'environnement et de l'administration fédérale se traduira-t-elle par des mesures permanentes, ou n'aura-t-elle qu'un effet temporaire, à l'exemple de ce qu'on a observé à la suite des autres crises de pollution des eaux souterraines survenues par le passé?

Chapitre 5

Intégration des sciences de l'eau et des politiques

Outre les perspectives politiques qui se sont fait jour dans chacun des comptes rendus de l'état des connaissances scientifiques, la question des moyens d'assurer une meilleure liaison entre les recherches portant sur la qualité des eaux souterraines et l'élaboration des politiques et la gestion des programmes la concernant s'est posée avec insistance et a donné lieu à un certain nombre d'observations :

1. Amélioration des communications entre les décideurs et les universitaires

Les participants ont majoritairement reconnu que les universités sont responsables au Canada du gros des efforts de recherche portant sur la qualité des eaux souterraines. Les compétences techniques des organismes publics provinciaux ont été particulièrement réduites. En conséquence, les chercheurs universitaires se sentent souvent isolés du processus de prise de décisions des pouvoirs publics, alors même que les gestionnaires des politiques et des programmes sont privés des sources d'informations scientifiques dont ils auraient besoin pour prendre de meilleurs décisions. C'est précisément cet état de fait qui a motivé l'organisation du présent atelier. Les participants ont notamment suggéré de promouvoir une participation plus concrète des gestionnaires de politiques et de programmes aux projets de recherches universitaires, d'intégrer d'emblée les considérations politiques dans la planification des projets de recherche et les décisions de financement, et d'encourager les gestionnaires des administrations publiques à suivre des stages de perfectionnement dans le cadre de congés sabbatiques. Les participants ont conclu que la responsabilité d'une meilleure intégration des sciences et des politiques n'incombait pas seulement aux chercheurs, et que les responsables des politiques devaient s'employer plus activement à intégrer les informations scientifiques qui les aideraient à renforcer leurs pratiques de gestion. D'autres suggestions sont énumérées ci-dessous ainsi que dans la section finale du présent rapport.

2. Les décideurs devraient se tenir au fait de l'évolution des connaissances scientifiques

Les participants ont reconnu d'une manière générale la nécessité d'une meilleure prise en compte des avancées scientifiques dans l'élaboration des règlements et des politiques ayant trait à l'eau. Ils ont souligné qu'il aurait été possible, compte tenu des connaissances actuelles sur l'eau souterraine, d'éviter les événements tragiques de Walkerton. Toutefois, l'état actuel des connaissances scientifiques n'est qu'un des nombreux facteurs dont il convient de tenir compte dans l'élaboration des politiques publiques. Certains experts ont fait valoir que le Canada traîne de l'arrière par rapport à la plupart des pays développés en matière de gestion dynamique des ressources en eaux souterraines en raison, principalement, de la perception selon laquelle il jouirait de ressources illimitées d'eau douce. Quoi qu'il en soit, les participants ont soutenu que nous possédons aujourd'hui au Canada des connaissances scientifiques et des moyens technologiques suffisant pour améliorer sensiblement notre gestion des eaux souterraines.

3. Mise en pratique des connaissances scientifiques

Il semble qu'en règle générale, les décideurs soient mal renseignés, pour diverses raisons, sur les résultats des quelque 20 dernières années de recherches consacrées à la qualité des eaux souterraines au Canada. Certains soutiennent qu'il appartient à la communauté scientifique de convaincre les pouvoirs publics du caractère prioritaire des mesures de protection de la qualité des eaux souterraines. En réalité, les scientifiques voient mal pourquoi il devraient consacrer leurs énergies à la communication de leurs résultats aux « profanes » de la communauté des décideurs. De plus, les scientifiques sont rarement attirés par la chose publique. D'autres observateurs font valoir au contraire que c'est aux autorités publiques qu'il appartient de solliciter l'avis des scientifiques et des experts techniques aux fins de l'élaboration des règlements et des politiques puisque la recherche est financée en majeure partie par les fonds publics. Il existe de nombreux moyens créatifs de promouvoir une telle collaboration : réseaux électroniques; organisation régulière de réunions conjointes de chercheurs et de décideurs; adoption de mesures propres à encourager la recherche financée par les fonds publics; recours à des groupes d'experts pour orienter les recherches dans le sens des priorités des autorités publiques. Le présent atelier constitue un premier pas dans cette direction. Le dernier chapitre du présent rapport énumère d'autres suggestions à ce propos.

4. Centres de documentation scientifique et répertoires d'experts

Pour favoriser une utilisation concrète des connaissances scientifiques, nous avons besoin de centres de documentation sur la qualité des eaux souterraines. Les informations de ces centres devraient être régulièrement mises à jour afin de rester utiles aux décideurs. On pourrait par ailleurs élaborer un répertoire électronique d'experts de la qualité des eaux souterraines qui accepteraient de servir de personnes-ressources aux décideurs pour l'étude de diverses questions.

5. Groupes d'experts pour une prise de décisions rapide

D'une manière générale, les chercheurs et les décideurs travaillent selon deux échéanciers différents. L'élaboration des politiques, de la réglementation et des programmes doit souvent obéir à des échéanciers très courts, qui exigent un accès rapide à des informations à jour, y compris aux informations de nature scientifique. Au Canada, il ne semble pas exister de mécanisme de promotion de la recherche sur la qualité des eaux souterraines dans les domaines prioritaires requis pour la prise de décisions. Aux États-Unis, le U.S. Water Science and Technology Board du National Research Council (NRC) fait souvent appel à des groupes sélects (Blue Ribbon Panels) pour favoriser l'orientation des recherches en faveur des domaines prioritaires d'élaboration des politiques. Ces groupes d'experts peuvent également fournir des conseils pour la gestion des problèmes immédiats de contamination des eaux souterraines. Les participants se sont montrés très favorables à l'adoption d'une telle démarche au Canada.

6. Les politiques et les programmes de recherche ont besoin d'être mieux articulés

Les experts de la qualité des eaux souterraines ignorent d'une manière générale la nature des recherches dont les décideurs ont besoin. Ils se montrent cependant assez flexibles, et accepteraient en fait volontiers de prendre en compte de nouvelles priorités politiques. Ils ont simplement besoin qu'on leur expose plus clairement et plus régulièrement ces priorités. Il convient cependant de réaliser qu'il sera toujours difficile pour les décideurs de définir précisément à l'avance les besoins en matière de recherche. On a fait preuve, à tout le moins, d'un vif intérêt pour les projets de politiques mis en œuvre par les divers ordres de gouvernement. Nous avons besoin d'une compilation concise, régulièrement mise à jour et facile à consulter des projets publics de politiques et de programmes ayant trait à la qualité des eaux souterraines mis en œuvre au Canada afin de pouvoir mieux partager et apprendre des expériences du passé. L'ordre du jour des futurs ateliers multidisciplinaires sur la qualité des eaux souterraines devrait par ailleurs être élaboré en tenant compte des besoins des gestionnaires de politiques et de programmes en matière de données scientifiques.

7. On ne saurait trop insister sur l'importance de l'approche à barrières multiples (ABM)

La nécessité d'une telle approche pour protéger les approvisionnements ruraux en eaux souterraines et promouvoir ainsi une meilleure gestion des systèmes d'eau potable est devenue un des thèmes principaux de l'atelier. Les participants ont en particulier insisté sur l'importance d'apporter des améliorations dans les domaines suivants :

- l'utilisation des terres et les pratiques de gestion des déchets;
- la protection des sources et des têtes de puits;
- les contrôles et les tests;
- les lignes directrices, la réglementation et leur application;
- la construction et l'entretien des puits;
- l'éducation et la formation;
- la recherche scientifique à l'appui de la prise de décisions;
- les évaluations conduites à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques.

Chapitre 6

Maintenir le dialogue

Les participants se sont montrés extrêmement favorables à la poursuite de l'échange d'informations et du dialogue entre la communauté scientifique et les gestionnaires de politiques et de programmes dans le domaine de la qualité des eaux souterraines. Au moment même où il s'emploie à préparer le présent rapport, le CCME se penche déjà sur les moyens qui pourraient permettre de maintenir, et même de renforcer le dialogue instauré à l'occasion de l'atelier. En plus de présenter un compte rendu des progrès scientifiques récents, les participants ont insisté pour que les futurs projets organisés dans ce sens prennent en ligne de compte les projets de politiques et les programmes élaborés d'un bout à l'autre du pays afin d'améliorer ou de maintenir la qualité des eaux souterraines.

Ateliers de suivi – Les participants ont appelé de leurs vœux l'organisation d'ateliers périodiques de suivi (abordant d'une manière générale l'état des ressources en eaux souterraines au Canada et d'une manière plus précise certaines questions y afférentes) ou de séances spéciales tenues à l'occasion de conférences particulières à l'intention des chercheurs et des décideurs. Ils ont en outre suggéré l'organisation d'ateliers conjoints réunissant deux des principales organisations participantes au présent atelier : le Réseau canadien de l'eau et CRESTech. Ces deux organisations se sont vues confier, dans leurs champs de compétences respectifs, de vastes responsabilités en matière de politiques institutionnelles et publiques. Les questions abordées à l'occasion de tels ateliers de suivi devraient en partie tenir compte des besoins actuels en matière de politiques et des priorités de l'heure. Enfin, on pourrait envisager la préparation de rapports périodiques sur l'état des connaissances scientifiques ou sur l'évaluation de la qualité des eaux souterraines.

Réseaux électroniques – Pour faire en sorte que les informations continuent de circuler, on envisagera le recours à divers types de médias électroniques : sites Web spéciaux ou « remaniés », babillards électroniques, bavardoirs avec animateurs ou listes d'adresses de courrier électronique de membres inscrits intéressés à des sujets particuliers. On pourrait également envisager la création d'un répertoire d'experts des eaux souterraines qui pourraient être consultés rapidement en cas d'urgence. De tels réseaux nécessitent des ressources et des efforts soutenus, et ont connu des succès variables par le passé. Ils pourraient cependant jouer un rôle utile en maintenant le niveau d'intérêt au cours des intervalles qui séparent les ateliers.

Les rencontres de chercheurs et de décideurs visent à terme à assurer la prise de meilleures décisions de politiques publiques, et c'est ce point qui motive l'intérêt que leur porte le CCME. Il est essentiel que les décideurs soient tenus au fait des plus récentes avancées scientifiques pour pouvoir bien orienter les programmes et élaborer et mettre en œuvre des politiques capables de rétablir et de protéger la qualité des eaux souterraines. Les discussions qui ont eu lieu au cours de l'atelier et dont le présent rapport fait état constituent un point de départ pour la prise de meilleures décisions sur la gestion des ressources.

Appendice 1 : Programme de l'atelier

21- 22 mars 2002

Salle de bal Alpine - Hôtel Sheraton Gateway - Aéroport de Toronto

Jour 1 – le jeudi 21 mars

11 h - 11 h 30	***Mots de bienvenue et présentation*** **M. Ken Dominie**, Coprésident, Comité de coordination sur l'eau du CCME et sous-ministre adjoint, Ministry of Environment, Terre-Neuve **M. Al Kohut**, Section Protection de l'eau, Ministry of Water, Land and Air Protection, Colombie-Britannique
11 h 30 - 12 h	***Aperçu des processus d'écoulement des eaux souterraines et du transport des contaminants*** **Dr. Robert Gillham**, CRSNG/Motorola/EnviroMetal Technologies Inc., Chaire de recherche industrielle en assainissement des eaux souterraines, Département des sciences de la Terre, University of Waterloo
12 h - 1 h	Déjeuner
13 h - 13 h 30	***Milieux de roches fracturées*** **Dr. Kent Novakowski**, Queens University, Département de génie civil
13 h 30 - 14 h	***Contamination des eaux souterraines naturelles*** **Dr. Carol Ptacek**, chercheur, Institut national de recherche sur les eaux, Environnement Canada
14 h - 14 h 30	***Rôle des aquitards dans le confinement des contaminants*** **Dr. Jim Hendry**, CRSNG - Cameco, chercheur et professeur, Département des sciences de la Terre, University of Saskatchewan
14 h 30 - 15 h	***Discussion en groupe n° 1 : Intégration des sciences de l'eau et des politiques,*** animée par **M. Dan McGillivary**, CRESTech
15 h - 15 h 30	Café
15 h 30 - 16 h	***Agents pathogènes*** **Dr. William Woessner**, Department of geology, University of Montana
16 h - 16 h 30	***Activités agricoles*** **Dr. Dick Coote**, Agricultural Watershed Associates, Ottawa
16 h 30 - 17 h	***Activités rurales et municipales*** **Dr. David Rudolph**, Département des sciences de la terre, University of Waterloo
14 h 30 - 15 h	***Discussion en groupe n° 2 : Intégration des sciences de l'eau et des politiques,*** animée par **M. Dave Briggins**, Ministry of Environment and Labour, Nouvelle-Écosse
18 h - 20 h	Diner, avec présentation par **Dr. John Cherry**, CRSNG, chaire industrielle d'hydrogéologie des con taminants, Département des sciences de la Terre, University of Waterloo

Jour 2 : le vendredi 22 mars

7 h 30 - 8 h 30 Petit déjeuner (Présentation de la journée)

8 h 30 - 9 h ***Mines et métallurgie,***
Dr. David Blowes, Chaire de recherche du Canada en assainissement des eaux souterraines, Département des sciences de la Terre, University of Waterloo

9 h - 9 h 30 ***Déversements (LNAD et LNAL),***
Dr. Jim Barker, Département des sciences de la Terre, University of Waterloo

9 h 30 - 10 h ***Impact de l'industrie du pétrole***
Dr. Kevin Parks, hydrogéologue principal, Alberta Geologic Survey, Edmonton

10 h - 10 h 30 ***Discussion en groupe n° 3 : Intégration des sciences de l'eau et des politiques,***
animée par **Dr. Susan Till**

10 h 30 - 11 h Café

11 h - 11 h 30 ***Évaluation des risques et des incertitudes***
Dr. Leslie Smith, Chaire Cominco pour les minéraux et l'environnement, Département des sciences de la terre et des océans, University of British Columbia

11 h 30 - 12 h ***Gestion des bassins hydrographiques, zones de protection des eaux souterraines et surveillance***
M. Darryl Pupek, directeur, ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick

12 h - 12 h 30 ***Discussion en groupe n° 4 : Intégration des sciences de l'eau et des politiques,***
animée par **Dr. Alex Bielak**, INRE

12 h 30 - 14 h Déjeuner

14 h - 14 h 20 ***Qualité de l'eau des puits au Canada***
Dr. Garth van der Kamp, Institut national de recherche sur les eaux, Environnement Canada

14 h 20 - 15 h 20 ***Initiatives touchant les eaux souterraines:***
Association canadienne des eaux souterraines : **M. Jamie McDonald**, directeur et ancien président
Fédération canadienne des municipalités : **M. Russell Powers**, coprésident de l'équipe nationale de la politique sur les options pour les eaux
Cadre de collaboration en matière d'eaux souterraines. **Dr. Alfonso Rivera**, hydrogéologue en chef, Commission géologique du Canada, RNCan
Plan d'action du CCME pour la surveillance de la qualité de l'eau. **M. Rob Kent**, gestionnaire, Bureau d'intégration et liaison scientifique, Environnement Canada
Réseau canadien de l'eau : **M. Don Lewis**, directeur administratif
L'approche américaine : **Dr. Frank Schwartz**, chercheur d'élite, Ohio State University

15 h 20 - 16 h 25 ***Synthèse et recommandations :***
Animé par **Dr. Grahame Daborn**, responsable du thème Politiques et gouvernance (RCE) et directeur du Acadia Centre for Estuarine Research

Aperçu des ateliers par :
un représentant des universités : **Dr. Frank Schwartz**, chercheur d'élite, Ohio State University
un représentant des gouvernements provinciaux : **M. Jim Gehrels**, coordonnateur des études sur les eaux souterraines, MEEO
un représentant du gouvernement fédéral : **M. John Cooper**, directeur, Division des ques tions hydrologiques, Environnement Canada
un représentant des organisations non gouvernementales: **M. Rick Findly**, directeur, Enquête pollution

16 h 25 - 16 h 30 ***Mots de clôture du CCME***
Ken Dominie, coprésident, comité de coordination sur l'eau, CCME

Appendice 2 : Biographies des conférenciers

Dr. James. F. Barker

Dr. Barker est professeur au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo (Ontario). Il détient un doctorat de cette université, où il est membre du corps enseignant depuis 1980. Il est également directeur du Département des sciences de la terre. Ses recherches portent principalement sur la migration et le devenir des contaminants organiques dans l'eau souterraine et sur les moyens de lutter contre ces contaminants. Il s'intéresse en particulier aux hydrocarbures (éther méthyltertiobutylique et alcools), aux constituants organiques de la créosote et à d'autres produits chimiques industriels. Ses recherches s'appuient sur des études réalisées sur le terrain et au laboratoire, ainsi que sur la modélisation. Il travaille directement sur les lieux contaminés et au site de l'aquifère expérimental de la base des Forces armées canadiennes de Borden. Ses travaux actuels portent principalement sur l'utilisation de l'atténuation naturelle contrôlée pour la décontamination des eaux souterraines. Il travaille en outre à la mise au point de technologies plus actives de décontamination applicables in situ et axées sur une biodégradation accélérée.

Dr. David Blowes

Dr. Blowes est professeur au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo (Ontario). Il a obtenu ses diplômes de premier, deuxième et troisième cycles en sciences de la terre et en hydrogéologie des contaminants à la University of Waterloo. Il est titulaire d'une chaire de recherche du Canada en dépollution des eaux souterraines. M. Blowes a réalisé des recherches sur le devenir des métaux présents dans les sites miniers et industriels et sur la dépollution de ces sites. Ses travaux s'appuient sur des études réalisées sur le terrain et au laboratoire, ainsi que sur des modèles numériques. M. Blowes est titulaire de cinq brevets internationaux ayant trait à des systèmes de décontamination des eaux souterraines, des eaux usées et des eaux de ruissellement des zones agricoles. Ces technologies sont autorisées sous licence en Europe, aux États-Unis et au Canada. Les recherches de Dr. Blowes sur la dépollution des eaux souterraines lui ont valu le Ontario Premiers Research Excellence Award et le prix Synergie pour l'innovation du CRSNG. Dr. Blowes a siégé au comité d'examen du CRSNG et à participé aux examens des programmes de gestion des déchets miniers de la Australian Nuclear Science and Technology Organization et du programme sur les substances toxiques du U.S. Geological Survey.

Dr. D. Richard Coote

Dick Coote (Ph.D., P. Ag, P. Ing.) a obtenu son doctorat en agronomie à la Cornell University en 1973, après avoir travaillé deux ans en Jamaïque. De 1973 à 1978, il a assuré la coordination technique des études sur les bassins hydrographiques agricoles réalisées dans le cadre du programme de la Commission mixte internationale visant à déterminer les effets de l'utilisation des terres sur les Grands Lacs. En 1978, il s'est joint à la Direction générale de la recherche d'Agriculture Canada à titre de chercheur spécialisé sur les sols et la qualité de l'eau. Il a acquis des compétences spécialisées en évaluation de la dégradation des sols soumis à diverses pratiques agricoles au Canada, et a étudié les effets des pluies acides sur les sols canadiens. En 1991, il est devenu directeur du Comité canadien de pédologie et responsable à ce titre de l'analyse et de la cartographie des sols pour l'ensemble des provinces canadiennes et du Yukon. Depuis 1996, Dick dirige la société Agricultural Watersheds Associates qui effectue des travaux de recherches et d'interprétation portant sur les sols et sur l'eau pour le compte de ministères du gouvernement fédéral et pour plusieurs compagnies privées. Il s'intéresse surtout aux eaux souterraines, et notamment à la modélisation de la migration des nitrates dans les sols et à la cartographie des aquifères fragiles. Il s'est occupé de la révision technique d'un rapport exhaustif sur l'agriculture et la qualité de l'eau au Canada publié par Agriculture et Agroalimentaire Canada en 2000 (La santé de l'eau : vers une agriculture durable au Canada). Plus récemment, il a fourni de l'assistance technique aux juristes qui ont surveillé l'exécution de l'enquête sur la tragédie de Walkerton. Depuis 1987, il gère une exploitation agricole de 180 acres dans le sud-ouest d'Ottawa, où il produit du soja et diverses céréales, et fait l'élevage de bovins de boucherie.

Dr. Allan S. Crowe

Allan Crowe a obtenu son baccalauréat en sciences de la terre à la University of Waterloo, et sa maîtrise et son doctorat en hydrogéologie au Département de géologie de la University of Alberta. Il justifie de plus de 25 années d'expérience en hydrogéologie, et a réalisé des projets dans ce domaine d'un bout à l'autres du Canada. Il occupe actuellement un poste d'hydrogéologue à l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada. Il s'intéresse en particulier au rôle des eaux souterraines dans l'équilibre hydrologique des terres humides et des lacs, au devenir des pesticides sous la surface du sol, ainsi qu'à l'élaboration et à l'utilisation de mod-

èles de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des solutés. Outre ses activités de recherche à L'INRE, il offre des services d'assistance technique à divers organismes et comités gouvernementaux. Il est également professeur adjoint à la University of Western Ontario ainsi qu'à la McMaster University. Par le passé, il a occupé les postes de président du chapitre canadien de la Society of Wetland Scientists et de rédacteur adjoint du Hydrogeology Journal, travaillé à titre de membre du Water Resources Theme de la société CRESTech, et siégé au comité spécial national pour la mise en place du « Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine ».

M. Ken Dominie

Monsieur Dominie est né dans le petit village de François, sur la côte méridionale de Terre-Neuve. Il a commencé son éducation à Port-aux-Basques, où il a obtenu son diplôme d'études secondaires en 1965. M. Dominie a obtenu son diplôme de génie civil au Nova Scotia Technical College (Halifax), puis son baccalauréat en sciences et sa maîtrise en administration des affaires à la Memorial University de Terre-Neuve. Il a commencé sa carrière d'ingénieur des réseaux d'aqueduc en 1974, au sein du ministère des Affaires municipales et provinciales du Gouvernement de Terre-Neuve. En 1976, il a été muté au ministère de l'Environnement où il a occupé divers postes. En mai 1998, il a été nommé sous-ministre adjoint de l'Environnement, poste qu'il occupe toujours aujourd'hui.

Dr. Robert W. Gillham

Dr. Gillham est professeur au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo (Ontario). Il est actuellement titulaire de la chaire de recherche industrielle en dépollution des eaux souterraines CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie)/Motorola/EnviroMetal Technologies. Tout en enseignant à l'université, il a occupé les postes de directeur du Waterloo Centre for Groundwater Research et de président de EnviroMetal Technologies. Il occupe actuellement le poste de directeur scientifique au Réseau canadien de l'eau, dans le cadre du programme du Réseau canadien des centres d'excellence. Il est membre de l'American Geophysical Union et de l'Association of Ground Water Scientists and Engineers. Il s'est mérité de nombreux prix, y compris un doctorat Honoris Causa en sciences de la University of Guelph et la médaille Miroslaw Romanowski de la Société royale du Canada, et il est membre de la Société royale du Canada. Il a reçu le titre de Heiland Lecturer à la Colorado School of Mines, et celui de Nabor Carrillo Lecturer à l'occasion de la réunion semestrielle de la Société mexicaine de mécanique des sols. Il a été rédacteur du Journal of Contaminant Hydrology et a siégé à de nombreux comités régionaux, nationaux et internationaux de la qualité des eaux souterraines. Il a produit ou participé à la production de plus de 140 publications abordant divers aspects des eaux souterraines, allant du comportement de constituants individuels de l'eau souterraine à la modélisation du transport de l'eau souterraine, en laboratoire et en conditions réelles. Robert Gilham est devenu membre de l'Ordre du Canada en 2002. Il a obtenu sont baccalauréat en sciences générales à la University of Toronto, sa maîtrise en sciences des sols à la University of Guelph, et son doctorat en agronomie à la University of Illinois.

Dr. M. Jim Hendry

Dr. Hendry est professeur au Département des sciences géologiques de la University of Saskatchewan. Il est titulaire de la chaire de recherche Cameco de géochimie aqueuse et environnementale ainsi que d'une chaire de recherches industrielles du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Dr. Hendry a obtenu son doctorat en sciences de la terre à la University of Waterloo en 1984. Au cours des 20 dernières années, ses recherches ont porté sur le devenir et le transport des solutés dans les matériaux géologiques à faible perméabilité ainsi que sur les réactions biotiques et abiotiques dans les zones insaturées. Dr. Hendry a reçu le titre de Distinguished Darcy Lecturer pour l'an 2000. Il est membre du Collège d'examinateurs du Programme des chaires de recherche du Canada, et est rédacteur adjoint de la Revue canadienne de géotechnique. M. Hendry a déjà été rédacteur adjoint du Journal of Ground Water and Contaminant Hydrology, et il a siégé pendant deux mandats au Conseil de direction de l'Association of Ground Water Scientists and Engineers.

M. Rob Kent

Rob Kent a obtenu son baccalauréat en biologie et en sciences des ressources environnementales à la Trent University, et sa maîtrise en toxicologie aquatique à l'Université d'Ottawa. Il a travaillé pendant 17 ans dans le domaine de l'évaluation et de la gestion de la qualité de l'eau et de la pollution environnementale pour le compte des administrations provinciales et fédérale ainsi que pour des consultants. À titre de chef de la Division des recommandations et des normes d'Environnement Canada, il a présidé pendant 8 ans à l'élaboration de recommandations nationales pour la qualité de l'eau et de mesures d'évaluation sous les auspices du CCME. Il a produit ou participé à la production de plus de 35 publications révisées par des pairs et portant sur les domaines de la qualité de l'eau, de la toxicologie, des recommandations et des évaluations du risque. Au cours des deux dernières

années, sa nouvelle équipe de la Direction de la qualité de l'environnement d'Environnement Canada est devenue le fer de lance d'une campagne de revitalisation des réseaux de contrôle de la qualité de l'eau au Canada. Il dirige actuellement le bureau national de coordination du programme de surveillance de la qualité de l'eau du ministère.

M. Al Kohut

Al Kohut est actuellement chercheur principal à la Section de la protection de l'eau du Ministry of Water, Land and Air Protection de la Colombie-Britannique, à Victoria. Il a commencé sa carrière à la Fonction publique provinciale il y a 27 ans, à titre d'ingénieur spécialiste des eaux souterraines, et a participé à ce titre à de nombreuses études sur l'approvisionnement en eau souterraine et sur la qualité de cette ressource. Au cours des récentes années, il a participé à l'examen des options réglementaires et non réglementaires de gestion des eaux souterraines, ainsi qu'à l'élaboration de recommandations et de normes provinciales concernant le forage des puits et les tests de ces puits. Il est titulaire d'une maîtrise en sciences de la University of Manitoba. Avant de s'installer en Colombie-Britannique il a occupé un poste d'ingénieur-géologue au sein de l'administration fédérale dans l'ouest du Canada, et il a travaillé à titre d'hydrogéologue en Afrique, pour le compte d'un cabinet canadien d'experts-conseils.

M. Don Lewis

Monsieur Lewis a travaillé pendant 20 ans dans le secteur privé, pour l'industrie et à titre d'expert-conseil. Il s'est surtout intéressé à l'évaluation environnementale des masses d'eau réceptrices, à la gestion des eaux usées et aux technologies de la désinfection. Il a effectué des recherches en collaboration avec des chercheurs de l'industrie, du secteur public et des universités au Canada et aux États-Unis. En novembre 2001, il est devenu le premier directeur administratif du Réseau canadien de l'eau.

Dr. Kent Novakowski

Dr. Novakowski a obtenu ses diplômes de deuxième et de troisième cycles en hydrogéologie au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo en 1982 et en 1992 respectivement. De 1989 à 1998, il a assuré la direction du Projet de dépollution des eaux souterraines de l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada. En septembre 1998, il est devenu professeur au Département des sciences de la terre de la Brock University et il occupe aujourd'hui un poste de professeur agrégé au Département de génie civil de la Queen's University. Depuis 1993, il donne des cours portant sur les caractéristiques générales des eaux souterraines, la modélisation des eaux souterraines, l'hydrologie de surface et l'écoulement et le transport dans les milieux de roches fracturées. Dr. Novakowski a également participé à de nombreux cours abrégés sur l'hydrogéologie des roches fracturées ou dirigé ces cours au Canada, aux États-Unis, en Afrique du Sud et en Australie. En plus d'enseigner, il a participé avec ses étudiants diplômés à des recherches expérimentales et théoriques sur l'hydrogéologie des roches fracturées. Il a en outre participé à l'élaboration de techniques innovatrices de caractérisation des sites, de modèles conceptuels et numériques détaillés de l'écoulement de l'eau souterraine et du transport des contaminants dans les roches fracturées, et à l'étude de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans les milieux de roches fracturées. Dr. Novakowski a diffusé les résultats de ses recherches dans de nombreuses revues à comité de lecture anonyme, ainsi qu'à l'occasion de séminaires et de conférences organisés en Amérique du Nord et outre-mer. Il siège actuellement au Comité éditorial du Journal of Contaminant Hydrology, et a déjà occupé les postes de rédacteur adjoint de Water Resources Research et du Journal of Groundwater. Dr. Novakowski est intervenu à titre d'expert-conseil sur de nombreux sites contaminés en Amérique du Nord; il agit actuellement à titre de conseiller principal de l'U.S. EPA pour un projet pilote visant à décontaminer un site de substrat rocheux contaminé par le TCE à l'aide d'injections de vapeur.

Dr. Kevin Parks

Dr. Parks est un géologue agréé de la province d'Alberta et travaille actuellement à titre d'hydrogéologue principal au Alberta Geological Survey du Alberta Energy and Utilities Board, à Edmonton (Alberta). Il a obtenu son baccalauréat spécialisé en géologie et sa maîtrise en géologie (spécialité en hydrogéologie du pétrole) à la University of Alberta, et son doctorat en géologie (spécialité en hydrogéologie) à la University of Calgary. Dr. Parks a occupé plusieurs postes de géologue spécialiste du pétrole dans tout l'ouest du Canada, mais surtout dans la région du bassin sédimentaire de l'Alberta. À titre de géologue, il a travaillé dans les domaines de l'exploration et de la mise en valeur des gisements classiques de pétrole et de gaz et des sables bitumineux, ainsi qu'à la caractérisation des réservoirs pour le compte de sociétés comme Dome Petroleum, Chevron Canada Resources, et Petro-Canada Oil and Gas Inc. À titre d'hydrogéologue, il a participé à des études sur l'approvisionnement en eau et sur la contamination, principalement dans les secteurs amonts de l'industrie du pétrole et du gaz, pour Alberta Environment et CH2M HILL, à Calgary. Il dirige actuellement le travail d'une équipe de géoscientifiques du Alberta Geological

Survey basée à Edmonton et qui est chargée de préparer des cartes hydrogéologiques et des études de caractérisation des aquifères du Dévonien, du Crétacé et du Quaternaire aux fins de la réglementation et de la mise en valeur de l'industrie naissante des sables bitumineux dans le nord de l'Alberta. Il participe également à des examens réglementaires des projets de mise en valeur de gisements de sables bitumineux au Alberta Energy and Utilities Board (EUB) et œuvre à titre de conseiller technique pour les audiences et les procédures d'arbitrage du EUB.

M. Russell Powers

Monsieur Powers est conseiller et maire adjoint de la nouvelle ville de Hamilton (Ontario). Il est membre du Conseil national de direction de la Fédération canadienne des municipalités (FCM), et agit également à titre de président de l'équipe nationale de la politique sur les options pour les eaux.

Dr. Carol Ptacek

Dr. Ptacek a obtenu son baccalauréat en géologie à la University of Wisconsin-Madison, et sa maîtrise et son doctorat en hydrogéologie des contaminants à la University of Waterloo. Elle conjugue actuellement son travail de chercheur à l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada et celui de professeur adjoint au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo. Ses recherches ont jusqu'à maintenant porté sur le devenir des solvants organiques et des produits du pétrole dans les eaux souterraines, le devenir des métaux dans les sites miniers et industriels, et le devenir des matières nutritives et des agents pathogènes issus des fosses septiques, dans les systèmes d'évacuation des eaux usées. Dr. Ptacek est titulaire de cinq brevets internationaux ayant trait à des systèmes de traitement passif permettant d'extraire les métaux, l'arsenic, le sélénium, les radionucléides, les agents pathogènes et les matières nutritives de l'eau souterraine contaminée, des eaux usées et de l'eau de ruissellement des zones agricoles. Ces technologies sont autorisées sous licence en Europe, aux États-Unis et au Canada. Les travaux de Dr. Ptacek dans le domaine de la dépollution des sites miniers lui ont valu de partager le prix Synergie pour l'innovation du CRSNG. Elle a siégé au Comité d'experts de l'U.S. EPA, ainsi qu'au comité de révision du CRSNG.

Dr. Alfonso Rivera

Dr. Rivera a étudié le génie, l'hydraulique, l'hydrologie de surface et l'hydrogéologie quantitative au Mexique, aux États-Unis et en France. Il a été responsable des systèmes d'approvisionnement en eau de la centrale nucléaire de Laguna Verde, au Mexique, et a mené des études sur plusieurs aquifères de la côte du Golfe du Mexique. Il a élaboré le seul modèle numérique tridimensionnel connu de la région métropolitaine de Mexico en intégrant l'hydrogéologie et la mécanique pour simuler simultanément la surexploitation des réserves d'eau souterraine et l'affaissement du terrain. Il a travaillé pendant 14 ans en Europe à titre d'expert en hydrogéologie. Il a participé à des programmes nationaux d'enfouissement de déchets radioactifs en Suisse, en Allemagne et en France. Pendant son séjour en Europe, il a également travaillé dans diverses universités et institutions de recherche en France et en Espagne. En 1999, Dr. Rivera est devenu l'hydrogéologue en chef de la Commission géologique du Canada. Il est responsable des projets d'hydrogéologie réalisés au CNRC, et il dirige le programme national sur l'eau souterraine du Conseil consultatif canadien des eaux souterraines.

Dr. David L. Rudolph

Dr. Rudolph est professeur adjoint au Département des sciences de la terre de la University of Waterloo où il enseigne l'hydrogéologie appliquée et l'hydrogéologie physique. Ses recherches portent principalement sur la mise en valeur et la gestion des sources régionales d'eaux souterraines, l'écoulement des eaux souterraines dans les sédiments fracturés à faible perméabilité et les milieux poreux insaturés. Il a beaucoup travaillé sur la gestion des approvisionnements municipaux en eaux souterraines, y compris les aquifères utilisés par la municipalité régionale de Waterloo et d'autres régions du sud de l'Ontario. Il a participé à divers travaux de recherche d'un bout à l'autre de l'Amérique du Nord, y compris au Mexique, ainsi qu'à des projets organisés au Costa Rica, au Brésil, au Chili et en Inde. Dr. Rudolph s'intéresse de très près à l'industrie agricole ontarienne, et notamment aux incidences environnementales et aux pratiques de gestion de rechange. Il est membre du Groupe de travail sur la qualité de l'eau de l'Ontario Environmental Farm Coalition, et il participe actuellement à divers projets de recherche en collaboration avec différents secteurs de l'agriculture. Dr. Rudolph est un ingénieur agréé; il est membre du Conseil de direction de l'Association of Scientists and Engineers de la National Groundwater Association.

M. Karl Schaefer

Karl Schaefer est conseiller principal en politiques scientifiques à l'Institut national de recherche sur les eaux de Burlington (Ontario). Il est titulaire d'une maîtrise en gestion des ressources en eau et en économie de l'environnement de la University of Waterloo. Sa présence à l'INRE renforce le lien entre les sciences de l'eau et les politiques. M. Schaefer était auparavant économiste de l'environnement et coordonnateur des programmes binationaux auprès

du Bureau des Grands Lacs et des affaires générales d'Environnement Canada, pour la région de l'Ontario, où il s'est intéressé aux problèmes touchant les Grands Lacs. Il a en outre déjà été membre du Conseil des gestionnaires de la recherche des Grands Lacs de la Commission mixte internationale.

Dr. Frank W. Schwartz

Dr. Schwartz a été nommé professeur d'élite en hydrogéologie à la Ohio State University en 1988. Il occupait auparavant un poste de professeur de géologie à la University of Alberta. Il est l'auteur de plus de 140 publications et est connu mondialement pour ses travaux sur les aspects pratiques et théoriques du transport de masse, de l'hydrogéologie des contaminant et de la géochimie des eaux souterraines. En reconnaissance de sa contribution à la recherche en hydrogéologie, il a été désigné co-récipiendaire du prestigieux prix O.E. Meinzer en 1984, co-récipiendaire du Excellence in Science and Engineering Award en 1991, et récipiendaire du King Hubbert Science Award en 1997. Il est devenu membre de l'American Geophysical Union en 1992. Outre ses activités d'enseignement et de recherche, Dr. Schwartz a offert ses services d'expert-conseil aux gouvernements et à l'industrie. Il a siégé dans divers comités d'experts du U.S. NRC et a assuré la présidence du comité chargé d'examiner l'utilité des modèles de transport des contaminants pour l'étude des problèmes contemporains d'hydrogéologie.

Dr. Leslie Smith

Dr. Smith est professeur au Département des sciences de la terre et de la mer de la University of British Columbia. Il est titulaire de la chaire Cominco de recherche sur les minéraux et l'environnement à la UBC. Ses recherches ont notamment porté sur les processus de transport des solutés non réactifs et réactifs dans les milieux de roches fracturées, l'analyse stochastique de l'écoulement des fluides et du transport des solutés dans les milieu poreux hétérogènes, l'analyse des décisions hydrogéologiques et l'évaluation des risques, les processus hydrologiques observables dans les amoncellements de déchets de roches des sites miniers, l'estimation des paramètres et la modélisation inverse, et le transport des radionucléides dans les bassins hydrographiques près de la centrale de Tchernobyl. Il a travaillé à titre d'expert-conseil pour diverses organisations publiques et privées du Canada et des États-Unis. Dr. Smith est membre du Comité de gestion de la recherche du Réseau canadien de l'eau. Il occupe actuellement le poste de président élu de la Section d'hydrologie de l'American Geophysical Union. Il est membre de la Société royale du Canada et de l'American Geophysical Union. Il s'est déjà mérité le prix Meinzer de la Geological Society of America, la médaille Macelwane de l'American Geophysical Union et la bourse Steacie du CRSNG. Il a en outre reçu le titre de *Birdsall Lecturer* de la Geological Society of America, et celui de conférencier de la Tournée pan-canadienne de la Société canadienne de géotechnique.

Dr. Garth van der Kamp

Garth van der Kamp a obtenu son doctorat en hydrogéologie en 1973, à l'Université libre d'Amsterdam. Il est actuellement à l'emploi de la Direction de Saskatoon de l'Institut national de recherche sur les eaux d'Environnement Canada. Il a déjà participé à de nombreux projets de recherche sur les eaux souterraines réalisés dans de nombreuses régions du Canada, ainsi qu'à un vaste projet de puits ruraux parrainé par l'ACDI et réalisé en Afrique de l'Ouest. Ses recherches actuelles portent principalement sur les interactions qui existent entre l'eau souterraine et l'eau de surface, et surtout sur le rôle de l'eau souterraine dans le cycle hydrologique, et les impacts de l'utilisation des terres sur la qualité des eaux souterraines. À titre de professeur adjoint, il surveille les travaux d'étudiants diplômés de plusieurs universités canadiennes. Il occupe par ailleurs le poste de vice-président du chapitre canadien de l'International Association of Hydrogeologists.

Dr. William W. Woessner

Dr. Woessner enseigne l'hydrogéologie appliquée à la University of Montana depuis 1981. Ses cours portent les titres d'hydrogéologie, hydrogéologie avancée, modélisation des eaux souterraines, modélisation avancée des eaux souterraines, interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines et dépollution des eaux souterraines. Il a obtenu son baccalauréat en géologie au College of Wooster, une maîtrise en géologie à la University of Florida, une autre en gestion des ressources en eau ainsi qu'un doctorat en géologie (hydrogéologie avec mineure en génie civil et environnemental) à la University of Wisconsin-Madison. Les recherches de Dr. Woessner portent principalement sur l'hydrogéologie régionale, l'approvisionnement en eau, les interactions entre l'eau de surface et l'eau souterraine et la modélisation de l'eau souterraine. Ses travaux récents ont également porté sur le transport des virus dans l'eau souterraine. Il a rédigé en collaboration avec Mary P. Anderson un ouvrage intitulé *Applied Groundwater Modeling*. Le professeur Woessner a siégé à divers comités du National Research Council, il a donné des cours abrégés sur la modélisation des eaux souterraines, il a offert des services d'expert-conseil à des entreprises privées, aux États du Montana et de l'Arizona et à de nombreuses agences fédérales. En 2000, il a reçu le titre de conférencier éminent de la Conférence Farvolden, à la University of Waterloo.

Appendice 3 : Liste des participants

Ministry of Water, Land and Air Protection, Colombie-Britannique

Al Kohut
Spécialiste principal des eaux souterraines
Water, Air and Climate Change Branch
Water Protection Section
B.C. Ministry of Water, Land and Air Protection
C.P. 9340, succ. « Prov. Govt »
Victoria (C.-B.) V8W 9M1
Tél. : (250) 387-9465; télécop. : (250) 387-2551
Courriel : Al.Kohut@gems7.gov.bc.ca

Alberta Environment

Walter Ceroici
Directeur – Land Branch
Science and Standards Division
Alberta Environment
4e étage, Oxbridge Place
9820, 106e rue
Edmonton (Alberta) T5K 2J6
Tél. : (780) 427-9759; télécop. : (780) 422-4192
Courriel : walter.ceroici@gov.ab.ca

Alberta Geological Survey

Kevin Parks
Alberta Geological Survey
4e étage, Twin Atria Building
4999, 98e avenue
Edmonton (Alberta) T6B 2X3
Tél. : (780) 427-2949; télécop. : (780) 422-1459
Courriel : kevin.parks@gov.ab.ca

Ministère de l'Environnement de l'Ontario

Jim Gehrels
Coordonnateur des études sur les eaux souterraines
Operation Clean Water
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
435, rue James sud, pièce 331
Thunder Bay (Ontario) P7E 6S7
Tél. : (807) 475-1726; télécop. : (807) 475-1754
Courriel : Jim.Gehrels@ene.gov.on.ca

Dave Neufeld
Directeur, Direction des politiques d'utilisation du sol/de gestion des eaux
Ministère de l'Environment de l'Ontario
135, avenue St. Clair ouest
Toronto (Ontario) M4V 1P5
Tél. : (416) 314-7049; télécop. : (416) 314-0461
Courriel : david.neufeld@ene.gov.on.ca

Deborah Brooker
Analyste principale, Direction des politiques d'utilisation du sol
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
135, avenue St. Clair ouest
Toronto (Ontario) M4V 1P5
Tél. : (416) 314-7064; télécop. : (416) 314-0461
Courriel : deborah.brooker@ene.gov.on.ca

John Mayes
Directeur, Section des normes techniques
Direction de l'élaboration des normes
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
40, avenue St Clair ouest, 6e étage
Toronto (Ontario)
Tél. : (416) 327-8220; télécop. : (416) 327-9187
Courriel : John.Mayes@ene.gov.on.ca

Robert Bruce
Hydrogéologue principal
Direction de l'élaboration des normes
Ministère de l'Environnement de l'Ontario
40, avenue St Clair ouest, 6e étage
Toronto (Ontario)
Tél. : (416) 327-6986; télécop. : (416) 327-9187
Courriel : Robert.Bruce@ene.gov.on.ca

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario

Hugh Simpson
Spécialiste des eaux souterraines rurales
Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario
1, rue Stone ouest, 3e étage sud-est
Guelph (Ontario) N1G 4Y2
Tél. : (519) 826-3835, télécop. : (519) 826-3259
Courriel : hugh.simpson@omafra.gov.on.ca

Stewart Sweeney
Spécialiste de la gestion environnementale –
devenir et transport des matières nutritives dans l'eau souterraine
Direction de la gestion des ressources
Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario
1, rue Stone ouest, 3e étage sud
Guelph (Ontario) N1G 4Y2
Tél. : (519) 826-4478; télécop. : (519) 826-3259
Courriel : stewart.sweeney@omafra.gov.on.ca

Nova Scotia Environment & Labour

David Briggins
Directeur
Direction de l'eau et des eaux usées
Department of Environment and Labour
5151, Terminal Road, 5e étage, C.P. 697
Halifax (Nouvelle-Écosse) B3J 2T8
Tél. : (902) 424-2571; télécop. : (902) 424-0503
Courriel : briggidr@gov.ns.ca

Newfoundland & Labrador Environment

Keith Guzzwell
Gestionnaire des ressources en eaux souterraines
Division de la gestion des ressources en eau
Department of Environment
Gouvernement de Terre-Neuve et du Labrador, C.P. 8700
St. John's (Terre-Neuve) A1B 4J6
Tél. : (709) 729-2539; télécop. : (709) 729-0320
Courriel : kguzzwell@gov.nf.ca

Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick

Diane Kent Gillis
Sous-ministre adjoint, Sciences et planification
Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux
Gouvernement du Nouveau-Brunswick
20, rue McGloin, Place Marysville, C.P. 6000
Fredericton (Nouveau-Brunswick) E2A 5T8
Tél. : (506) 453-2862; télécop. : (506) 453-2265
Courriel : diane.kentgillis@gnb.ca

Darryl Pupek
Directeur, Direction des sciences et des comptes rendus
Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux
Gouvernement du Nouveau-Brunswick
20, rue McGloin, Place Marysville, C.P. 6000
Fredericton (Nouveau-Brunswick) E2A 5T8
Tél. : (506) 457-4844; télécop. : (506) 453-2265
Courriel : darryl.pupek@gnb.ca

Kim Hughes
Directeur, Planification des ressources marines et en eau
Direction de la planification durable
Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux
Gouvernement du Nouveau-Brunswick
20, rue McGloin, Place Marysville, C.P. 6000
Fredericton (Nouveau-Brunswick) E2A 5T8
Tél. : (506) 457-4846; télécop. : (506) 457-7823
Courriel : kim.hughes@gnb.ca

Environnement Canada

Rod Allan
Directeur administratif adjoint
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-4678; télécop. : (905) 336-4420
Courriel : rod.allan@ec.gc.ca

Allan Crowe
Hydrogéologue
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-4585; télécop. : (905) 336-4400
Courriel : allan.crowe@ec.gc.ca

Carol Ptacek
Hydrogéologue
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-6246; télécop. : (905) 336-6430
Courriel : carol.ptacek@ec.gc.ca

Suzanne Lesage
Chef de projet
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-4877; télécop. : (905) 336-6430
Courriel : suzanne.lesage@ec.gc.ca

Alex Bielak
Directeur, Direction de la liaison scientifique
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-4503; télécop. : (905) 336-6444
Courriel : karl.schaefer@ec.gc.ca

Karl Schaefer
Direction de la liaison scientifique
Institut national de recherche sur les eaux
867, chemin Lakeshore
Burlington (Ontario) L7R 4A6
Tél. : (905) 336-4884; télécop. : (905) 336-6444
Courriel : karl.schaefer@ec.gc.ca

Garth van der Kamp
Chercheur
Institut national de recherche sur les eaux
11, Innovation Boulevard
Saskatoon (Saskatchewan) S7N 3H5
Tél. : (306) 975-5721; télécop. : (306) 975-5143
Courriel : garth.vanderkamp@ec.gc.ca

John Temple
Direction des affaires de l'eau
Environnement Canada
351, boulevard Saint-Joseph
Hull (Québec) K1A 0H3
Tél. : (819) 994-6245
Courriel : john.temple@ec.gc.ca

Danielle Rodrigue
Direction des affaires de l'eau
Environnement Canada
351, boulevard Saint-Joseph
Hull (Québec) K1A 0H3
Tél. : (819) 953-1522
Courriel : danielle.rodrigue@ec.gc.ca

Rob Kent
Directeur
Bureau d'intégration et liaison scientifique
Service de la conservation de l'environnement
Environnement Canada
351, boulevard Saint-Joseph
Hull (Québec) K1A 0H3
Tél. : (819) 953-1554; télécop. : (819) 953-0461
Courriel : robert.kent@ec.gc.ca

John Gibb
Agent de projet
Section des sciences de l'eau et des zones côtières
Division de la science des écosystèmes et de l'information
Direction de la conservation de l'environnement
Environnement Canada – Région de l'Atlantique
45, Alderney Drive
Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 2N6
Tél. : (902) 426-1698; télécop. : (902) 426-4457
Courriel : john.gibb@ec.gc.ca

Daniel Millar
Questions relatives à l'eau
Environnement Canada – Région du Pacifique et du Yukon
700 – 1200, 73e avenue ouest
Vancouver (Colombie-Britannique) V6P 6H9
Tél. : (604) 664-9345; télécop. : (604) 664-9126
Courriel : daniel.millar@ec.gc.ca

R. Scott McDonald
Conseiller principal en politiques
Direction générale des politiques et affaires ministérielles
Service météorologique du Canada
Environnement Canada
4e étage, Les Terrasses de la Chaudière
10, rue Wellington
Hull (Québec) K1A 0H3
Tél. : (819) 994-4803; télécop. : (819) 994-8854
Courriel : scott.mcdonald@ec.gc.ca

Heather Auld
Directeur, Division des sciences atmosphériques
Service météorologique du Canada
Environnement Canada – région de l'Ontario
4905, rue Dufferin

Toronto (Ontario) M3H 5T4
Tél. : (416) 739-4291; télécop. : (416) 739-4721
Courriel : heather.auld@ec.gc.ca

Santé Canada

David Green

Ingénieur-conseil principal
Programme de la qualité de l'eau
Division de la qualité de l'eau et de la microbiologie
Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs
Santé Canada
Édifice MacDonald, pièce B 0536
123, rue Slater (indice de l'adresse 3505 A)
Ottawa (Ontario) K1A 0K9
Tél. : (613) 957-3130; télécop. : (613) 952-2574
Courriel : dave_green@hc-sc.gc.ca

Ressources naturelles Canada

Susan M. Till

Sous-ministre adjoint associé
Secteur des sciences de la terre
Ressources naturelles Canada
580, rue, Booth, 14B4
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Tél. : (613) 995-3081; télécop. : (613) 992-8874
Courriel : till@NRCan.gc.ca

Alfonso Rivera

Hydrogéologue en chef
Commission géologique du Canada
Ressources naturelles Canada
880, Chemin Sainte-Foy, Bureau 840
Case Postale 7500
Québec (Québec) G1V 4C7
Tél. : (418) 654 2688; télécop. : (418) 654-2615
Courriel : arivera@nrcan.gc.ca

L. Harvey Thorleifson

Chercheur
Commission géologique du Canada
Ressources naturelles Canada
601, rue Booth, pièce 119
Ottawa (Ontario) K1A 0E8
Tél. : (613) 992-3643; télécop. : (613) 992-0190
Courriel : thorleifson@gsc.nrcan.gc.ca

Paul W. Allen

Analyste principal des politiques
Division du développement durable et des affaires internationales
Direction de la coordination de la politique et du portefeuille
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 20e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Tél. : (613) 947-0023; télécop. : (613) 996-0478
Courriel : pallen@nrcan.gc.ca

Agriculture et Agroalimentaire Canada

John Lebedin

Directeur, Section des sciences de la terre
Administration du rétablissement agricole des Prairies
Agriculture et Agroalimentaire Canada
603 – 1800, rue Hamilton
Regina (Saskatchewan) S4P 4L2
Tél. : (306) 780-5207; télécop. : (306) 780-5018
Courriel : lebedinj@em.agr.ca

Pêches et Océans Canada

Terry Shortt

Directeur, Division des sciences environnementales
Ministères des Pêches et des Océans
Région centrale et arctique
501, University Crescent
Winnipeg (Manitoba) R3T2N6
Tél. : (204) 983-5062; télécop. : (204) 984-2404
Courriel : shorttt@dfo-mpo.gc.ca

CCME

Ken Dominie
Sous-ministre adjoint
Ministère de l'Environnement
4^{e} étage, Édifice de la Confédération
Édifice de l'Ouest – Promenade Prince Phillip
C.P. 8700
St. John's (Terre-Neuve) A1B 4J6
Tél. : (709) 729-2559; télécop. : (709) 729-5905
Courriel : kdominie@mail.gov.nf.ca

Municipalités

Russ Powers

Conseiller, ville de Hamilton
Hôtel de Ville, 2^{e} étage
71, rue Main ouest
Hamilton (Ontario) L8P 4Y5
Tél. : (905) 546-2714; télécop. : (905) 546-3266
Courriel : rpowers@city.hamilton.on.ca

Heather Malcolmson

Hydrogéologue principale
Services de la planification et du transport
Région de Halton
Département de la planification et des travaux publics
Tél. : (905) 825-6000, poste 7134; télécop. : (905) 825-8822
Courriel : malcolmsonh@region.halton.on.ca

Organisations environnementales/industrielles/professionnelles

Dick Coote

Agricultural Watershed Associates
37, rue Pretty
Stittsville (Ontario) K2S 1N5
Tél. : (613) 836-1924
Courriel : dcoote@compmore.net

Don Lewis

Directeur administratif
Réseau canadien de l'eau
200, avenue University ouest
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 888-4567, poste 6171; télécop. : (519) 883-7574
Courriel : d2lewis@sciborg.uwaterloo.ca

Jamie McDonald

Directeur et ancien président
Association canadienne des eaux souterraines
a/s Island Well Drillers Limited, C.P. 545
Sydney (Nouvelle-Écosse) B1P 6H4
Tél. : (902) 562-3444; télécop. : (902) 539-7977
Courriel : macdonaldj@syd.eastlink.ca

Stephen Moran

Président-directeur général
CRESTech, (Centre for Research in Earth and Space Technology)

4850, rue Keele, 2e étage
Toronto (Ontario) M3J 3K1
Tél. : (416) 665-5402; télécop. : (416) 665-2032
Courriel : moran@admin.crestech.ca

Dan McGillivary
Directeur général
CRESTech, (Centre for Research in Earth and Space Technology)
4850, rue Keele, 2e étage
Toronto (Ontario) M3J 3K1
Tél. : (416) 665-3311; télécop. : (416) 665-2032
Courriel : balinder@admin.crestech.ca

Steve Shikaze
Géoscientifique principal
EarthFX Inc.
3363, rue Yonge
Toronto (Ontario) M4N 2M6
Tél. : (416) 410-4260, poste 7; télécop. : (416)-481-6026
Courriel : steve@earthfx.com

Robert V. Wright
Sierra Legal Defence Fund
900 – 30, rue St. Patrick
Toronto (Ontario) M5T 3A3
Tél. : (416) 368-7533, poste 31; télécop. : (416) 363-2746
Courriel : rwright@sierralegal.org

Rick Findlay
Directeur, bureau d'Ottawa
Enquête Pollution
63, rue Sparks, pièce 101
Ottawa (Ontario) K1P 5A6
Tél. : (613) 237-8666; télécop. : (613) 237-6111
Courriel : rfindlay@pollutionprobe.org

Steve Holysh
Conservation Authorities Moraine Coalition
2596, chemin Britannia ouest, R.R. no 2
Milton (Ontario) L9T 2X6
Tél. : (905) 336-1158, poste 246; télécop. : (905) 336-7014
Courriel : steveholysh@hrca.on.ca

Universités

Jim Barker
Département des sciences de la terre
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 885-1211, poste 2103
Courriel : barker@cgrnserc.uwaterloo.ca

David Blowes
Département des sciences de la terre
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 885-1211, poste 4878
Courriel : blowes@sciborg.uwaterloo.ca

Jim Hendry
Département des sciences géologiques
114, Science Place
University of Saskatchewan
Saskatoon (Saskatchewan) S7N 5E2
Tél. : (306) 966-5720; télécop. : (306) 966-8593
Courriel : jim.hendry@usask.ca

Kent Novakowski
Département de génie civil
Ellis Hall
Queens University
Kingston (Ontario) K7L 3N6
Tél. : (613) 533-6417; télécop. : (613) 533-2128
Courriel : kent@civil.queensu.ca

Dave Rudolph
Département des sciences de la terre
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 888-4567, poste 6778
Courriel : drudolph@cgrnserc.uwaterloo.ca

Leslie Smith
Département des sciences géologiques
University of British Columbia
6339, Stores Road
Vancouver (Colombie-Britannique) V6T 2B4
Tél. : (604) 822-4108
Courriel : lsmith@eos.ubc.ca

William Woessner
Department of Geology
University of Montana
Missoula, Montana 59812, USA
Tél. : (406) 243-5698
Courriel : gl_www@selway.umt.edu

Bob Gillham
Département des sciences de la terre
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 885-1211, poste 4658
Courriel : rwgillha@uwaterloo.ca

John Cherry
Département des sciences de la terre
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Tél. : (519) 885-1211, poste 4516
Courriel : cherryja@sciborg.uwaterloo.ca

Graham Daborn
Directeur
Acadia Centre for Estuarine Research
Acadia University
Wolfville (Nouvelle-Écosse) B0P 1X0
Tél. : (902) 585-1113; télécop. : (902) 585-1054
Courriel : graham.daborn@acadiau.ca

F.W. Schwartz
Department of Geological Sciences
275 Mendenhall Laboratory
125 S Oval Mall
Ohio State University
Columbus, Ohio 43210-2721, USA
Tél. : (614) 292-6196; télécop. : (614) 292-7688
Courriel : frank@geology.ohio-state.edu

Graeme Spiers
Directeur, Centre de surveillance environnementale
Université Laurentienne
933, chemin du lac Ramsey
Sudbury (Ontario) P3E 6B5
Tél. : (705) 675-1151, poste 5087
Courriel : gspiers@mirarco.org